

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**РОЗУМЕНКО ВІКТОР ТИМОФІЙОВИЧ**

УДК 550.388

**ДИСЕРТАЦІЯ  
ДЛЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ  
НА АТМОСФЕРНО-КОСМІЧНІ РАДІОКАНАЛИ**

Спеціальність 01.04.03 – «Радіофізика»  
(Фізико-математичні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ В. Т. Розуменко

Науковий консультант:

Чорногор Леонід Феоктистович, доктор фізико-математичних наук, професор

Харків–2021

## АНОТАЦІЯ

Розуменко В. Т. Дія високоенергетичних джерел на атмосферно-космічні радіоканали. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної проблеми – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високоенергетичних джерел природного та штучного походження на характеристики радіохвиль і атмосферно-космічні радіоканали, які використовуються засобами телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо.

Метою дисертаційної роботи є дослідження основних фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, що супроводжували вплив на навколоземне середовище падіння Челябінського та Камчатського метеороїдів, геокосмічних бур, тайфунів, землетрусів, стартів великих ракет, польотів космічних апаратів і потужного наносекундного радіовипромінювання, важливих для поширення радіохвиль і функціонування радіоканалів.

З першого розділу, який є оглядовим, випливає, що адекватне дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних впливом високоенергетичних джерел, доцільно й обґрунтовано проводити в рамках системної парадигми, що враховує динамічні та нелінійні властивості відкритих систем Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) і Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ). Продемонстровано, що цілий ряд джерел природної та техногенної природи мають значну енергетику, в результаті чого виникає взаємодія підсистем в системах ЗАІМ і СМСМІАЗ.

У другому розділі обґрунтовано, що утворення СМСМІАЗ і ЗАІМ є складними відкритими динамічними нелінійними системами. Розвинено основні

положення системної парадигми. Перераховано основні властивості згаданих систем. Обґрунтовано механізми взаємодії підсистем в системах ЗАІМ і СМСМІАЗ. Розраховані густини потоків електронів і протонів та обґрунтовані типи хвиль, які супроводжують взаємодію підсистем.

Третій розділ присвячено моделюванню іоносферних ефектів, викликаних прольотом і вибухом Челябінського космічного тіла. Проліт і вибух Челябінського космічного тіла викликав у всіх геооболонках помітні (або сильні) збурення. За результатами моделювання висота вибуху Челябінського тіла була близька до 25 км. Установлено, що відносні збурення тиску повітря та концентрації електронів на іоносферних висотах над епіцентром вибуху досягали сотень процентів. Помітні збурення від вибуху поширювалися на горизонталі на відстані в кілька тисяч кілометрів. Космічні тіла, подібні Челябінському суперболіду (малому астероїду), падають на Землю у середньому з частотою один раз на 65 років.

За часовими варіаціями доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналів похилого зондування іоносфери на 6 радіотрасах виявлені іоносферні збурення, що послідували за прольотом і вибухом 18 грудня 2018 р. Камчатського метеороїда з початковою кінетичною енергією 173 кт ТНТ. Збурення мали 2–3 групи часів запізнення. Залежно від відстані між місцем вибуху метеороїда й областю середини радіотраси ці часи змінювалися в межах 24–43, 93–136 і 141–183 хв. Їм відповідали удавані швидкості 1.9–2.9 км/с, 620–770 і 310–500 м/с. Обґрунтовано, що збурення, які мали удавані швидкості у сотні метрів за секунду, а також періоди близько 10–15 хв, переносяться атмосферними гравітаційними хвилями. Збурення, яким відповідає удавана швидкість 1.9–2.9 км/с, могли бути обумовлені іоносферними процесами, викликаними сейсмічною хвилею від вибуху метеороїда.

Для українського регіону вивчено добові та сезонні залежності величини, напрямку, зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості в мезосфері. Показано, що його значення зазвичай становить 10–80 м/с при абсолютній похибці 3–7 м/с. Виявлені значні варіації модуля швидкості (в 2 –

5 разів) і її напрямку (на  $140\text{--}180^\circ$ ), викликані, ймовірно, проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль і їхніх гармонік. У дні, близькі до весняного і осіннього рівнодення, виявлено підсилення цих варіацій, пов'язане з глобальною перебудовою циркуляції атмосфери на мезосферних висотах, що сприяє підсиленню інтенсивності атмосферних хвиль.

Обґрунтовано, що нагрів електронів надкоротким радіоімпульсом на висотах 30 – 60 км суттєвий вже при  $\tau = 1$  нс та  $P = 1$  ГВт. Пробій атмосфери на висотах 30 – 60 км настає вже при  $P_{\min}=0.3\text{--}1.3$  ГВт і  $f \approx 10$  ГГц. При зменшенні частоти до 1 ГГц  $P_{\min}$  збільшується до 1 – 30 ГВт. Для оптимізації процесу пробією атмосфери на висотах 30 – 60 км радіоімпульсами  $P_{\min}$  необхідно збільшити приблизно в 25 – 64 раз.

У четвертому розділі продемонстрована можливість спостереження на відстанях  $\sim 1\text{--}2$  тис. км динамічних процесів у іоносфері, супутніх землетрусам помірної сили ( $M \approx 5.9\text{--}6.6$ ). Сейсмічна активність 7 липня 2018 р., 5 вересня 2018 р. та 11 квітня 2019 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період 4–5 хв), генеровані поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів при цьому становила 4.5–9 %. Тривалість цуга коливань була в межах 24–55 хв. Швидкість поширення хвильових збурень була близько 3 км/с. Виявлено хвильові збурення (період 15–30 хв), які могли бути згенеровані поблизу епіцентру та поширювалися від нього у вигляді атмосферних гравітаційних хвиль, модулюючих концентрацію електронів у іоносфері. Відносна амплітуда квазіперіодичних збурень концентрації електронів становила 30–55 %. Тривалість хвильового цуга досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с.

У п'ятому розділі за допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію супертайфуну Hagibis. Дія супертайфуну



супроводжувалась підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувались хвильові процеси з періодом від 2 до 7 хв і від 12–15 до 60–150 хв. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалась за допомогою акустико-гравітаційних хвиль. Найбільший вплив на іоносферу виявлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику (8, 10 і особливо 9 жовтня 2019 р.). При цьому супертайфун знаходився на відстані ~2500 – 3000 км від середини радіотрас похилого зондування. Під дією хвильових процесів 9 жовтня 2019 р. висота відбиття радіохвиль коливалась в межах (від  $\pm 30$ –50 км до  $\pm 60$ –90 км). Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів у F-області іоносфери змінювалась від 10 – 12% для періодів ~20 хв до 30 – 60% для періодів ~60 – 120 хв. В іоносфері були виявлені інфразвукові коливання. Період інфразвуку змінювався від 2 до 7 хв, залежно від висоти зондування. Відносна амплітуда квазіперіодичних коливань електронної концентрації коливалась у діапазоні 0.2–0.4%.

У шостому розділі описано результати досліджень низки іоносферних бур різної інтенсивності. Аналіз часових варіацій електронної концентрації на висотах 73.5 –82.5 км під час дуже сильної геокосмічної бурі 7–11 листопада 2004 р. виявив збільшення її середніх значень (на 50–100%) та амплітуд її варіацій (у деяких сплесках в 3–5 разів) у магнітозбурені дні. Значення хвильових збурень у відносних амплітудах протягом бурі зазвичай становили 0,05–0,15, а під час другого магнітного збурення (10 листопада 2004 р.) спостерігалось невелике збільшення їх значень. Чіткого зв'язку між рівнем магнітної активності та параметрами хвильових збурень у нижній іоносфері не виявлено.

Зафіксовано значне (на порядок і більше) збільшення варіацій і стандартних відхилень горизонтальних складових магнітного поля в магнітно-збурені періоди. Спостерігались сплески Pc5–6 з амплітудами, що досягали 30 та 50 нТл для  $H$  і  $D$  компонент відповідно. Протягом деяких проміжків часу мав місце взаємозв'язок між пульсаціями Pc5–6 та короткочасними (5–15 хв) хвильовими збуреннями електронної концентрації нижньої іоносфери. Ця взаємодія може бути спричинена як стимуляцією магнітними пульсаціями квазіперіодичного середньоширотного

висипання електронів з магнітосфери так і генерацією  $Pc5-6$  пульсацій і атмосферних гравітаційних хвиль в полярних районах і їх поширенням до середніх і більш низьких широт.

Багаточастотні багатотрасові спостереження за динамікою іоносфери під час іоносферної бурі дозволили встановити наступне. 14 травня 2019 р. в інтервалі часу з 06:00 до 11:00 мала місце позитивна іоносферна буря. Встановлено, що  $f_oF_2$  при цьому збільшувалася від  $\sim 5$  до  $7-8$  МГц. Іоносферна буря призвела до зміщення вгору області відбиття радіохвилі в залежності від радіотраси на  $\sim 50-180$  км. Протягом бурі спостерігалися прояви атмосферних гравітаційних хвиль з періодом  $15-30$  хв. Амплітуда відносних збурень концентрації електронів становила  $4-8\%$ . Буря супроводжувалася генерацією інфразвуку з періодом близько  $5$  хв. При цьому амплітуда відносних збурень концентрації електронів була близько  $0.7\%$ .

Дослідження іоносферних бур у широкому діапазоні висот методом некогерентного розсіяння дозволило виявити позитивні та негативні іоносферні бурі, значне збільшення температури електронів, несуттєве збільшення температури іонів, значні варіації відносної концентрації іонів водню та динаміки іоносферної плазми.

Запропонована нова класифікація іоносферних бур в залежності від геомагнітної обстановки. До першої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжують сильні магнітні бурі ( $K_p \geq 8$ ). До другої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжували незначні магнітні бурі ( $K_{pmax} = 5$ ). Природно, що помірні іоносферні бурі супроводжують помірні магнітні бурі. Важливо, що помірні іоносферні бурі можуть супроводжувати сильні магнітні бурі.

У цьому розділі продемонстровано, що акустичні та гравітаційні хвилі від ракетних двигунів поширюються в іоносфері на відстані не менше  $2300$  км (для важких ракет і ракет середньої ваги). Часто після приходу зазначених збурень іоносфера на висотах F-області турбулізується та виникає ефект «розсіпання» доплерівських спектрів. Не рідко на відстанях до  $2300$  км від ракети спостерігаються більш швидкі збурення, ніж акустичні. Їхня швидкість становить

10–20 км/с. Як переносник при цьому можуть виступати гіротропні хвилі. Встановлено, що при стартах космічних апаратів (КА) в іоносфері спостерігаються збурення на віддаленні близько 10000 км. Механізм їхньої генерації може бути пов'язаний як з роботою найбільш потужних маршових двигунів в приземній атмосфері, так і з функціонуванням менш потужних двигунів останніх ступенів і маневрових двигунів в іоносфері. Друге пояснення більш правдоподібне тому, що має більш зрозумілий механізм генерації реактивним струменем електромагнітних хвиль і хвиль МГД-типу у плазмі. Такими хвилями є гіротропні хвилі. За даними наших спостережень їхня швидкість становила 10 – 25 км/с. Вперше встановлено, що приблизно за 60 – 80 хв до посадки КА в іоносфері фіксуються збурення тривалістю у кілька десятків хвилин, пов'язані, швидше за все, з включенням гальмівних (маневрових) двигунів. Удавана швидкість розповсюдження цих збурень близько 10 – 20 км/с. Друга група збурень має швидкість 2 – 3 км/с. У багаторічних експериментах спостерігалися три групи швидкостей: 0,5 – 0,7 км/с і менше, 2 – 3 км/с і 10 – 25 км/с. Швидше за все, їм відповідають акустико-гравітаційні, повільні МГД-і гіротропні хвилі відповідно. Проведені багаторічні спостереження за варіаціями геомагнітного поля у діапазоні періодів 1 – 1000 с, які були пов'язані зі стартами розгінних ступенів ракет на різних космодромах у всьому світі та визначені основні параметри хвильових збурень (періоди, тривалість і швидкість поширення). Обґрунтовано механізм генерації магнітних збурень.

**Ключові слова:** системна парадигма, високоенергетичне джерело, землетрус, тайфун, падіння метеороїда, геокосмічна буря, старт ракети, характеристики радіохвилі, доплерівське зміщення частоти, амплітуда радіосигнала, атмосферно-космічний радіоканал, аперіодичне та квазіперіодичне збурення, іоносфера.

## ABSTRACT

Rozumenko V. T. Action of High-Energy Sources on Atmospheric and Space Radio Channels. – Qualifying scientific work is as a manuscript.

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics: Speciality 01.04.03–Radio Physics (Physics and Mathematics). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is concerned with solving a topical problem, the experimental and theoretical study of the impact of high-energy sources of natural and artificial origins on the characteristics of radio waves and on atmospheric and space radio channels that are used in radar, radio navigation, telecommunications, direction-finding radio system, etc.

The goal of the dissertation is to study the main physical processes in the atmosphere and geospace that accompanied the impact of the Chelyabinsk and Kamchatka meteoroids on the environment, the influence of geospace storms, typhoons, earthquakes, launches of large rockets, and of the firing of orbital maneuvering thrusters, as well as the influence of high-power nanosecond radio emissions, which all are important for radio wave propagation and radio channel performance.

From the first section, which is a review, it follows that the systems paradigm, which takes into account the dynamic and nonlinear properties of the open Earth–atmosphere–ionosphere–ionosphere system (EAIMS) and the Sun–interplanetary medium–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth (SIMMIAE) system, provides an efficient and reasonable framework for an adequate study of the physical processes caused in the atmosphere and geospace by high-energy sources. It is shown that a number of sources of natural and man-made nature have significant enough energy to cause the interaction between the subsystems in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system EAIMS and SIMMIAE system.

In the second section, the SIMMIAE system and EAIMS are shown to be complex open dynamic nonlinear systems. The main principles of the system paradigm are developed. The main properties of the above-mentioned systems are listed. The foundation for the mechanisms of interaction between the subsystems in EAIMS and

SIMMIAE system are established. The electron and proton fluxes are calculated, and the types of waves that accompany the interaction of the subsystems are found.

The third section deals with the simulation of ionospheric effects caused by the flight and explosion of the Chelyabinsk celestial body. The flight and explosion of the Chelyabinsk celestial body caused noticeable (or strong) disturbances in all geospheres. According to the simulation results, the height of the Chelyabinsk body explosion was close to 25 km. It is established that the relative perturbations in the air pressure and in the electron number densities at ionospheric heights above the epicenter of the explosion attained hundreds per cent. Noticeable disturbances from the explosion spread horizontally at a distance of several thousand kilometers. Celestial bodies, like the Chelyabinsk superbolide (small asteroid), fall on Earth on average at a rate of one per 65 years.

According to the temporal variations in the Doppler spectra and in the relative amplitudes of the signals traveling along 6 propagation paths at oblique incidence, ionospheric perturbations were detected to follow the flight and explosion of the Kamchatka meteoroid with initial kinetic energy of 173 kt TNT on December 18, 2018. The disturbances exhibited 2–3 groups of time delays. Depending on the distance between the place of explosion of the meteoroid and the midpoint of the radio paths, these times varied between 24–43, 93–136, and 141–183 min. They correspond to apparent speeds of 1.9–2.9 km/s, 620–770, and 310–500 m/s, respectively. These perturbations, which have apparent speeds of hundreds of meters per second and periods of about 10–15 min, are shown to be carried by atmospheric gravity waves. The disturbances, which correspond to the apparent speed of 1.9–2.9 km/s, could be due to ionospheric processes caused by the seismic wave from the meteoroid explosion.

For the Ukrainian region, the daily and seasonal dependences of the magnitude, direction, the zonal and meridional components of the velocity in the mesosphere have been studied. Its value is shown to usually be equal to 10–80 m/s with an absolute error of 3–7 m/s. Significant variations (by a factor of 2–5 times) in the velocity magnitude and its direction (by 140–180°) have been revealed; they are probably caused by the passage of internal gravity waves and their harmonics. During the days close to the

Spring and Autumn equinoxes, an increase in these variations due to the global reorganization of atmospheric circulation at mesospheric altitudes, which contributes to the intensification of atmospheric waves was observed.

The heating of electrons by an ultra-short radio pulse at altitudes of 30–60 km is shown to already be significant at  $\tau = 1$  ns and  $P = 1$  GW. The atmospheric breakdown at altitudes of 30–60 km occurs at  $P_{\min}=0.3\text{--}1.3$  GW and  $f \approx 10$  GHz. When the frequency is reduced to 1 GHz,  $P_{\min}$  increases to 1–30 GW. To optimize the process of atmospheric breakdown by radio pulses at altitudes of 30–60 km,  $P_{\min}$  must be increased approximately by a factor of 25–64 times.

The fourth section demonstrates the possibility of observing dynamic processes that accompany a moderate earthquake ( $M \approx 5.9\text{--}6.6$ ) in the ionosphere at distances of not less than 1–2 thousand km. Seismic activity on July 7, 2018, September 5, 2018, and April 11, 2019 in Japan was accompanied by aperiodic processes in the ionosphere at distances of at least 1–2 thousand kilometers from the epicenter, by an increase in the number of rays and by a significant broadening of the Doppler spectra. The wave perturbations were detected in the range of infrasonic oscillations (periods of 4–5 min), which are generated by the Rayleigh surface wave launched by the earthquake. The relative amplitude of the quasi-periodic variations in the electron number density was observed to be 4.5–9%. The duration of the train of oscillations was in the range of 24–55 min. The velocity of wave perturbations was about 3 km/s. The wave perturbations (periods of 15–30 min) were detected, which could have been generated near the epicenter and propagated from there in the form of atmospheric gravity waves modulating the electron number density in the ionosphere. The relative amplitude of the quasi-periodic perturbations of the electron number density was estimated to be 30–55%. The duration of the wave train attained about 100 min, for the speed of about 0.3 km/s.

In the fifth section, the response of the ionosphere to the action of the super typhoon Hagibis was revealed using the multi-frequency multipath HF system based on the software-defined radio technology and used for sounding the ionosphere at oblique incidence. The action of the super typhoon was accompanied by an increase in wave

activity in the atmosphere, when waves were generated with periods from 2 min to 7 min and from 12–15 min to 60–150 min. The interaction in the system atmosphere–upper atmosphere–ionosphere was confirmed to be carried by acoustic and gravity atmospheric waves. The greatest impact on the ionosphere was observed to occur on those days when the super typhoon had the maximum energy (8, 10 and especially October 9, 2019). The super typhoon was located at a distance of ~2,500–3,000 km from the midpoints the propagation radio paths. Under the influence of the wave processes on October 9, 2019, the height of reflection of the radio waves fluctuated within the  $\pm 30$ –50 km to  $\pm 60$ –90 km interval. The relative amplitude of the quasi-periodic variations in the electron number density in the ionospheric F region varied from 10–12% for periods of ~20 min to 30–60% for periods ~60–120 min. Manifestations of infrasonic oscillations in the ionosphere have been revealed. The period of infrasound varied from 2 to 7 min, depending on the height of the sounding. The relative amplitude of the quasi-periodic oscillations in the electron number density fluctuated in the range of 0.2–0.4%.

The sixth section describes the results of studies of a number of ionospheric storms of varying intensity. Analysis of the time variations in the electron number density at altitudes of 73.5–82.5 km during a very strong geospace storm of November 7–11, 2004 revealed an increase in its average values (by 50–100%) and the amplitudes of its variations (in some bursts by a factor of 3–5 times) on magnetically perturbed days. The values of wave perturbations in the relative amplitudes during the storm were usually 0.05–0.15, and during the second magnetic perturbation (November 10, 2004) a small increase in their values was observed. No clear relationship between the level of magnetic activity and the parameters of wave perturbations in the lower ionosphere has been revealed.

A significant (by an order of magnitude or greater) increase in the variations and standard deviations in the horizontal components of the magnetic field in magnetically perturbed periods was recorded. Pc5–6 pulsations with amplitudes reaching 30 nT and 50 nT in the H- and D-components, respectively, were observed. During some time intervals, a relationship between Pc5–6 pulsations and short-term (5–15 min) wave

disturbances in the electron number density in the lower ionosphere was observed to occur. This interaction can be caused both by midlatitudinal quasi-periodic electron precipitation from the magnetosphere stimulated by the magnetic pulsations and by the generation of Pc5–6 pulsations and atmospheric gravity waves in the polar regions and their propagation to middle and lower latitudes.

Multi-frequency multipath observations of the ionospheric dynamics during the ionospheric storm revealed the following. On May 14, 2019, in the time interval from 06:00 to 11:00, a positive ionospheric storm took place. It was found that  $f_oF_2$  increased from ~5 MHz to 7–8 MHz. The ionospheric storm led to an upward shift in the area of reflection of the radio wave depending on the radio paths by 50 – 180 km. During the storm, epy manifestations of atmospheric gravity waves with a period of 15–30 min. The amplitude of the relative perturbations of the electron number density was estimated to be 4–8%. The storm was accompanied by the generation of infrasound with a period of about 5 min. The amplitude of the relative perturbations in the electron number density was estimated to be about 0.7%.

The incoherent scatter study of ionospheric storms revealed positive and negative ionospheric storms in a wide range of heights, a significant increase in the electron temperature, a nonessential increase in the ion temperature, and considerable variations in the relative hydrogen ion density and in the dynamics of the ionospheric plasma.

A new classification of ionospheric storms as a function of the geomagnetic situation has been proposed. The ionospheric storms accompanying strong magnetic storms ( $K_p \geq 8$ ) belong to the first group. The second group includes ionospheric storms that accompanied minor magnetic storms ( $K_{p\max} = 5$ ). It is important to have noted that moderate ionospheric storms can accompany strong magnetic storms.

In the seventh section, acoustic and gravity waves from rocket engines have been demonstrated to propagate over distances of at least 2,300 km in the ionosphere (for heavy- and medium-weight missiles). Often after the arrival of these perturbations, the ionosphere at F-region heights becomes turbulent, and the spread effect in the Doppler spectra appears. Often at distances of up to 2,300 km from the rocket, perturbations traveling faster than sound were observed. Their speed was observed to be



10–20 km/s, with the possibility that the gyrotropic waves act as a carrier. It is established that during the launch of spacecraft, disturbances in the ionosphere are observed at a distance of about 10,000 km. The mechanism of their generation can be related to the operation of the most powerful propulsion engines in the near Earth's surface, as well as the operation of less powerful engines of the last rocket stages and of orbital maneuvering thrusters in the ionosphere. The second explanation is more plausible because it provides a clearer mechanism for the generation of electromagnetic and MHD waves in plasma by the jet stream. Such waves are termed to be gyrotropic waves. According to our observations, their speed was estimated to be 10–25 km/s. For the first time, it was found that about 60–80 min before the landing of the spacecraft, disturbances appearing in the ionosphere and lasting for several tens of minutes were recorded, which most likely were caused by the firing of orbital maneuvering thrusters. The apparent speed of propagation of these disturbances is about 10–20 km/s. The second group of perturbations has a speed of 2–3 km/s. In experiments conducted over many years, the following three groups of speeds were observed: 0.5–0.7 km/s and less, 2–3 km/s and 10–25 km/s. Most likely, they correspond to acoustic and atmospheric gravity, slow MHD and gyrotropic waves, respectively. The variations in the geomagnetic field in the range of 1–1000 s, which were associated with the launch of rockets at various spaceports around the world, were observed for many years, and the main parameters of wave perturbations (periods, duration, and speeds of propagation) have been determined. The mechanism for generating the magnetic perturbations has been founded.

**Keywords:** systems paradigm, high-energy source, earthquake, typhoon, meteoroid entry, geospace storm, rocket launch, radio wave characteristic, Doppler frequency shift, radio signal amplitude, atmospheric and space radio channel, aperiodic and quasi-periodic disturbance, ionosphere

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, № 2. — С. 181–190. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
2. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 209–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
3. Динамические процессы в среднеширотной мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. — 2006. — Т. 12, № 2/3. — С. 37–44. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
4. Chernogor L. F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Radio Physics and Radio Astronomy. — 2008. — Vol.13, N 2. — P. 120–137. *(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
5. Chernogor L. F. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Problems of Atomic Science and Technology. — 2013. — Vol. 86, N 4. — P. 136–139. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

6. Geomagnetic variations caused by rocket launches from the Plesetsk and the Baikonur cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 26. — С. 84–87. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

7. Черногор Л. Ф. Взаимодействие сверхмощных радиоимпульсов наносекундной длительности с атмосферой и плазмой нижней ионосферы / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов, **В. Т. Розуменко** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 27. — С. 53–56. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

8. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar / Qiang Guo, Yu Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2019. — Вип. 30. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

9. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере / Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Q. Guo, Yu Zheng, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цимбал // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2018. — Вип. 28. — С. 88–93. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

#### ***Наукові праці в зарубіжних наукових виданнях:***

10. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed

Ionosphere. Technical Facilities / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 4–5. — P. 6–20. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

11. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 6. — P. 1–22. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

12. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури / К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко** О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. — 1999. — Т. 39, № 1. — С. 72–78.

12 a. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm / K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. — 1999. — Vol. 39, N 1. — P. 69–75. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

13. Martynenko S. I. New possibilities for mesospheric electricity diagnostics / S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Advances in Space Research. — 2001. — Vol. 27, Iss. 6–7. — P. 1127–1132. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

14. Remote earthquake-induced large-scale ionospheric disturbances and strong mesospheric electric fields / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Telecommunications and Radio Engineering. — 2002. — Vol. 57, Is. 10–11. — P. 136–140. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

15. Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radars / C. E. Meek, A. H. Manson, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2004. — Vol. 66, N 10. — P. 881–890. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

16. Statistical parameters of nonisothermal lower ionospheric plasma in the electrically active mesosphere / S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. H. Manson, C. E. Meek // Advances in Space Research. — 2005. — Vol. 35, N 8. — P. 1467–1471. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз параметрів плазми в D області. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

17. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники — 2005. — № 3. — С. 36–54. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

18. Ionospheric storms associated with geospace storms as observed with the Kharkiv incoherent scatter radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Sun and Geosphere. — 2008. — Vol. 3, N 2. — P. 81–86. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

19. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Sun and Geosphere. — 2012. — Vol. 7, N 2. —

P. 133–139. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

20. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2019. — Vol. 186. — P. 88–103. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

21. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Radio Science. — 2020. — Vol. 55, Iss. 2. — e2019RS006866. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

22. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Advances in Space Research. — 2020. — Vol. 66, Iss. 2. — P. 226–242. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

23. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, S. N. Shulga, Y. Zheng // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2020. — Vol. 207. — Paper No. 105336. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

**Список публікацій, які додатково відображають наукові результати  
дисертації:**

24. Studies of Global and Large-Scale Ionospheric Phenomena due to Sources of Energy of Different nature / **V. T. Rozumenko**, L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1193–1198. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

25. The Radiophysical Observatory for Remote Sounding of the Ionosphere / O. F. Tyrnov, K. P. Garmash, A. M. Gokov, A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, L. G. Kontzevaya, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, A. S. Shemet // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1260–1265. *(Особистий внесок здобувача: Написання розділу по методу часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

26. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вестник Харьковского университета. Серия «Радиофизика и электроника». — 1998. — № 405. — С. 157–177. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

27. Chernogor L. F. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, N 2. — P. 191–197. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків частинок при стартах ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

28. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вісник Харківського університету. Серія «Радіофізика та електроніка». — 1999. — Вип. 1, № 427. — С. 3–22. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

29. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 7. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

30. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 8. — С. 3–19. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

31. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 227–246. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*



32. Залюбовский И. И. Система Земля – атмосфера – геокосмос: основные свойства, процессы и явления / И. И. Залюбовский, Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні. 2006–2008. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАНУ-НКАУ. — Київ: Академперіодика, 2008. — С. 19–29.

32 a. Zalyubovsky I. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena / I. Zalyubovsky, L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. — Kyiv: Akadempriodyka, 2008. — P. 19–29.

*(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

33. Черногор Л. Ф. Физические эффекты в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. — Київ: Академперіодика, 2011. — С. 16–23.

33 a. Chernogor L. Physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine. — Kyiv: Akadempriodyka, 2011. — P. 22–34.

*(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

34. Черногор Л. Ф. Особенности физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2010–2012. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2012. — С. 31–48.

34 a. Chernogor L. Features of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2010–2012. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2012. — P. 29–46.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

35. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2012–2014. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2014. — С. 13–20.

35 a. Chernogor L. Study of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2012–2014. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2014. — P. 13–20.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

36. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. — Київ: Академперіодика, 2016. — С. 25–33.

36 a. Chernogor L. Results of the investigation of physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // National Academy of Science of Ukraine. State Space Agency of Ukraine. — Kyiv: Akademperiodyka, 2016. — P. 23–30.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

37. Chernogor L. Results of the Investigation of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** //

Space Research in Ukraine 2016–2018. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2018. — P. 41–51.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

38. Chernogor L. Physical effects in the atmosphere and geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2018–2020. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2020. — P. 61–70. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збуреній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

**Список публікацій,  
які засвідчують апробацію матеріалів дисертації  
(Тези доповідей на наукових конференціях):**

39. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft / A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, I. I. Kapanin, A. I. Karpachev, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, N. N. Mashtaler, Yu. B. Milovanov, V. A. Misyura, O. V. Pakhomova, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, E. N. Protopop, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, S. G. Chulakov, O. S. Shemet // Физика космической плазмы : Международный семинар, Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет имени Тараса Шевченко, 6–10 июня 1993 г., Киев, 1995. — С. 161–170. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

40. Influence of global disturbances of the propagation of ionospheric MF and HF radio waves: Technique / L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, Yu. B. Milovanov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1996, 21–26 July 1996. – Baltimore, 1996. — Vol. 3.

— P. 2236–2239. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

41. A method for derivation of electric fields in the lower ionosphere from measurements with a partial reflection facility / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine : MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 271–273. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

42. HF Doppler probing of ionospheric perturbations which accompanied the space shuttle Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

43. Chernogor L. F. Regularization algorithms for inverse problems in the radiowave probing of the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine : MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 154–156. *(Особистий внесок здобувача: постановка задачі, участь в обговоренні результатів.)*

44. Observations of ionospheric D region perturbations which accompanied the space shuttle orbiter Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background by partial reflection technique / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, A. I. Gritchin, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol. 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

45. Chernogor L.F. On the possibility of energetic particle precipitation from the magnetosphere into the middle latitude ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

46. Chernogor L. F. Investigations of energetic particle precipitations due to HF Radio heating and rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation : Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

47. Effects in the ionosphere during rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation : Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 84. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

48. Chernogor L. F. Numerical modeling of ionospheric effects of electron gyro-frequency radio emission turn-on / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1-491. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

49. Chernogor L. F. Numerical simulations of nonlinear interactions of non-stationary high-power electromagnetic waves with the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical

Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–492. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

50. Chernogor L. F. Geomagnetic micropulsations near Kharkiv stimulated by the "SURA" high-power HF facility / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–497. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

51. Chernogor L. F. Energetic particle fluxes in the midlatitude lower ionosphere from partial reflection radar measurements / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVIth General Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada : Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 437. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

52. Chernogor L. F. Variations of partially reflected radio signals after rocket launches / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // XXVIth General Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada : Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 467. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

53. Гармаш К. П. Исследование при помощи частично-отраженных радиосигналов параметров потоков энергичных частиц в среднеширотной нижней ионосфере / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция “Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 141–142. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

54. Гармаш К. П. Вариации статистических характеристик частично-отраженных радиосигналов после запусков мощных ракет / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция

“Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 357–358. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

55. Gokov A. M. Large-scale disturbances originating from remote earthquakes in the plasma at mesospheric heights / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine : Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 655–657. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

56. Chernogor L. F. Radio probing of the perturbations originating in the near-Earth plasma from natural and anthropogenic energy sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні - 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна : Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 497–500. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

57. Chernogor L. F. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near Earth plasma / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні – 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна : Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 514–516. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

58. Chernogor L. F. HF Doppler probing the disturbances originating in the ionosphere from natural and anthropogenic sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov,

**V. T. Rozumenko** // VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine : Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 652–654. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

59. Variations in HF Doppler radar spectra measured at vertical incidence / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands : Poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

60. Doppler radar measurements of bottomside ionosphere perturbations associated with space vehicle launch and maneuvering system burns / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands : Programme, poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0142. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

61. Доплеровское радиозондирование средней ионосферы в естественно-возмущенных условиях / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2 – 4 июля 2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация : Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 42–43. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

62. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е и F-областях ионосферы, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2–4 июля



2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация : Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 44–45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

63. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 21 – 26 сентября 2002 р., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2002. — С. 45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

64. Доплеровское радиозондирование ионосферы как средство мониторинга состояния космической погоды / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 144–151. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

65. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 132–143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

66. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третя Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня 2003 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9,

№ 5/6. — С. 76–80. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

67. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопровождавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третя Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня 2003 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9, № 2. — С. 76–81. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

68. Флуктуации геомагнитного поля, сопровождающие грозы / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Е. А. Пахомов, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г., Владимир, Российская Федерация : Сборник трудов конференции. — Владимир, 2003. — Т. 1. — С. 193–195. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітних ефектів грозових розрядів в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

69. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 91. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

70. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопровождавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 133. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

71. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в ионосфере, сопутствовавших стартам и полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Международная конференция «Современные проблемы физики и высокие технологии», посвященная 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ, 29 сентября–4 октября 2003 г., Томск, Российская Федерация : Материалы конференции. — Томск, 2003. — С. 464–467. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

72. Динамічні процеси на мезосферних висотах / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тирнов, Л. Ф. Черногор // Міжнародна наукова конференція «Каразінські природознавчі студії», 14–16 червня 2004 р., Харків, Україна : Матеріали конференції. — Харків, 2004. — С. 151–153. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

73. Параметры динамических процессов в мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Четвертая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 19–26 сентября 2004 г., Понизовка, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Понизовка, 2004. — С. 57. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

74. Движения неоднородностей электронной концентрации в D-области ионосферы / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Международная конференция по физике солнечно-земных связей, 20–25 сентября 2004 г., Иркутск, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Иркутск, 2004. — С. 60. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

75. Statistics on the parameters of nonisothermal ionospheric plasma in large mesospheric electric fields / S. Martynenko, **V. Rozumenko**, O. Tyrnov, A. Manson, C. Meek // 35th COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2004, Paris, France : 35th

COSPAR Scientific Assembly. — Vol. 35 — P. 533. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

76. VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60 – 70 km Altitude Range / A. H. Manson, C. E. Meek, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Meeting RTO-MP-IST-056 8 — 1 Characterising the Ionosphere, Neuilly-sur-Seine, France : Meeting Proceedings. — Neuilly-sur-Seine, 2006. — P. 8-1–8-24. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз впливу збурень на поширення радіохвиль. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

77. Комплекс для дистанционного зондирования околоземного космического пространства / О. Ф. Тырнов, К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, А. М. Цимбал // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006), 11–15 сентября 2006 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2006. — Т. 2. — С. 954–955. — ISBN 966-7968-90-1. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

78. MF radar studies of wave disturbances in the mesosphere / L. Chernogor, S. Clifford, S. Panasenko, **V. Rozumenko** // 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing, China : 36th COSPAR Scientific Assembly. — Beijing, 2006. — Vol. 36. — P. C2.2-0083-06. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

79. Ionospheric Storms Associated with Geospace Storms as Observed with the Kharkiv Incoherent Scatter Radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria : Book of

Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 52. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

80. Chernogor L. F. The observational features of the November 7 – 10, 2004 geospace superstorm in the lower ionosphere / L. F. Chernogor, S. V. Panasenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria : Book of Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 50–51. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

81. Статистические характеристики параметров ветра в мезосфере над Украиной / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // 8-я Украинская конференция по космическим исследованиям, 1–7 сентября 2008 г., Евпатория, Крым : Сборник тезисов. — Евпатория, 2008. — С. 41. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

82. Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory: Space Research / K. P. Garmash, A. I. Gritchin, S. I. Martynenko, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009), 14–18 сентября 2009 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2009 г. — Т. 2. — С. 943–944. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

83. Физические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. в Харькове / В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. —

Харьков, 2012. — С. 219–221. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

84. Processes in the bottomside ionosphere accompanied by the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8–12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets : Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 157 – 158. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

85. Geophysical and radio propagation effects of the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. A. Leus, **V. T. Rozumenko** // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8 – 12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets : Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 156–157. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

86. Розуменко В. Т. Магнито-ионосферные эффекты стартов и полетов космических аппаратов / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2012. — С. 224–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

87. Martynenko S. I. Temporal variations of electric fields density in the middle atmosphere / S. I. Martynenko, O. F. Tyrnov, **V. T. Rozumenko** // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013), 9–13 сентября 2013 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2013. — Т. 2. — С. 1124–1125. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз електричних ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

88. Upgrades to the Kharkiv V. N. Karazin National University MF radar antenna / V. L. Dorohov, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine : Proceedings. — Odessa, 2013. — 2013 — P. 370–372. *(Особистий внесок здобувача: Опис антени радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

89. Розуменко В. Т. Физические процессы, сопровождающие старты и полёты мощных ракет / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор, В. П. Бурмака // I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24 – 25 октября 2013 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 32–35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

90. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических и наземных экспериментах и исследования распространения радиоволн различных диапазонов / К. П. Гармаш, В. А. Поднос, **V. T. Rozumenko**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24–25 октября 2013 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 89–110. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

91. Ionospheric, atmospheric, and geomagnetic effects of the March 20, 2015 solar eclipse over Kharkiv city / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» в рамках IX Всеукраїнського фестивалю науки присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всехсвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня

2015 р., Київ : Збірник тез доповідей. — Київ, 2015. — С. 107–108. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

92. Ионосферный, атмосферный и геомагнитный эффекты частичного солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // 15<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research, 24–28 August 2015, Odesa, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2015. — P. 145. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

93. Chernogor L. F. Effects of Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // International conference “Astronomy and Space Physics in Kyiv University”, May 24–27, 2016, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical observatory, Kyiv, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2016. — P. 95–96. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

94. Detection of Effects from Rocket Launches Employing the System Spectral Analysis / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XVII International Young Scientists' Conference on Applied Physics, May, 23–27, 2017, Kyiv, Ukraine : Proceedings. — Kyiv, 2017. — P. 180–181. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

95. Chernogor L. F. Magnetic and Ionospheric Effects of Power Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // 17<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research, August, 21–25, 2017, Odesa, Ukraine : Abstracts. — Odesa, 2017. — P. 152. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

96. Using the System Spectral Analysis for Detecting Effects from Rocket Launches from Remote Cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash,



**V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XIII International Conference “Electronics and Applied Physics”, October 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2017. — P. 217–218. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

97. Characterizing the infrasonic signal generated by the Chelyabinsk celestial body: Global statistics / L. F. Chernogor, Qiang Guo, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», 23–24 травня 2018 р., Умань, Україна : Програма і тези доповідей. — Умань, 2018. — С. 85–86. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

98. Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City / L. F. Chernogor, O. I. Liashchuk, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 87–88. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів хімічних вибухів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

99. The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid / L. F. Chernogor, G. Qiang, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 89–90. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

100. Chernogor L. F. The action of ultra-short super-powerful radio pulses on Earth's atmosphere and ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4–7, 2018, Odesa, Ukraine : Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 40. *(Особистий внесок*

здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

101. Chernogor L. F. The Action of Ultra-Short Super-Powerful Radio Pulses on Earth's Atmosphere and Ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4 – 7, 2018, Odesa, Ukraine : Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 322–325. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

102. Гармаш К. П. Геомагнитные эффекты, сопровождавшие старты ракет в 2017 — 2018 годах / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // 18 Українська конференція з космічних досліджень, 17 – 20 вересня 2018, Київ, Україна : Тези доповідей конференції. — Київ, 2018. — С. 25. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

103. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 87–88. *(Особистий внесок здобувача: Дослідження великомасштабних ефектів в іоносфері під дією окремих землетрусів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

104. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 88–90. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

105. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 2019 IEEE

2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine : Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 88–93. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

106. The Parameters of the Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk meteoroid: System Statistic Analysis Results / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine : Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 938–941. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

107. Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science, August 26–30, 2019, Kyiv, Ukraine : Programme, Abstracts, Information. — Kyiv, 2019. — P. 33. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

108. Solar flare of September 2017 magnetic effect / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, M. Yu. Holub, S. G. Leus, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 76–77. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

109. Magnetic and ionospheric effects of the 5 — 6 August 2019 geospace storm / Y. Zheng, Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 79–80. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

110. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week : 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine : Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 253–258. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

111. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week : 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine : Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 354–359. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	46
ВСТУП.....	48
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	59
1.1. Короткі відомості про об'єкт дослідження.....	59
1.1.1. Загальні відомості.....	59
1.1.2. Процеси в системі ЗАІМ.....	61
1.1.3. Процеси в системі СМСМІАЗ.....	63
1.2. Високоенергетичні джерела фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі.....	64
1.2.1. Енергетика сонячних спалахів.....	65
1.2.2. Енергетика викидів корональної маси.....	65
1.2.3. Енергетика сейсмічних процесів.....	65
1.2.4. Енергетика стартуючих ракет.....	68
1.2.5. Енергетика падаючих космічних тіл.....	69
1.3. Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних землетрусами.....	70
1.3.1. Загальні відомості про землетруси.....	70
1.3.2. Іоносферні ефекти землетрусів.....	74
1.3.3. Результати спостережень.....	76
1.4. Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних тайфунами.....	77
1.5. Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних геокосмічних бурями.....	80
1.6. Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних Челябінським метеороїдом.....	83
1.6.1. Загальні відомості про Челябінський метеороїд.....	83
1.6.2. Іоносферні ефекти Челябінського метеороїда.....	84

1.6.3. Особливості Челябінського метеороїда.....	84
1.7. Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних стартами ракет.....	86
1.7.1. Загальні відомості.....	86
1.7.2. Відомості про космодроми та ракети.....	89
1.7.3. Вплив запусків ракет на приземну атмосферу.....	91
1.7.4. Вплив космічної діяльності на геокосмос.....	92
1.7.5. Основні ефекти стартів ракет в іоносфері.....	93
1.7.6. Вплив збурень в іоносфері на поширення радіохвиль.....	94
1.8. Експериментальна база досліджень.....	95
1.8.1. Радіофізична обсерваторія.....	95
1.8.2. Багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери.....	99
Висновки до розділу 1.....	102
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ГЕОКОСМОСІ В СВІТЛІ СИСТЕМНОЇ ПАРАДИГМИ.....	106
2.1. Загальні відомості.....	106
2.2. Основні положення системної парадигми.....	106
2.3. Взаємодія підсистем в системах ЗАІМ та СМСМІАЗ.....	108
Висновки до розділу 2.....	114
РОЗДІЛ 3. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ Й ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ ВПЛИВОМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ РІЗНОЇ ПРИРОДИ.....	116
3.1. Загальні відомості.....	116
3.2. Фізичні процеси в атмосфері й іоносфері, які супроводжували падіння Челябінського метеороїду.....	117
3.3. Фізичні процеси в атмосфері й іоносфері, які супроводжували падіння Камчатського метеороїду.....	123
3.3.1. Загальні відомості про метеороїд.....	123
3.3.2. Стан космічної погоди.....	124

3.3.3. Засоби та методи.....	125
3.3.4. Результати спостережень.....	125
3.3.5. Аналіз результатів.....	130
3.4. Динамічні процеси в нижній іоносфері.....	137
3.4.1. Загальні відомості.....	137
3.4.2. Результати спостереження.....	139
3.4.3. Аналіз результатів експериментів.....	141
3.5. Пробій атмосфери наносекундними радіоімпульсами.....	147
3.5.1. Загальні відомості.....	147
3.5.2. Результати числових розрахунків.....	147
Висновки до розділу 3.....	149
<b>РОЗДІЛ 4. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГЕОКОСМОСІ,</b>	
<b>ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ВПЛИВ ЗЕМЛЕТРУСІВ.....</b>	<b>152</b>
4.1. Загальні відомості.....	152
4.2. Землетрус 7 липня 2018 р.....	153
4.2.1. Стан космічної погоди.....	153
4.2.2. Результати спостережень.....	154
4.2.3. Роль сонячного термінатора.....	163
4.2.4. Зв'язок спостережуваних процесів із землетрусом.....	166
4.2.5. Параметри хвильових збурень.....	168
4.3. Землетрус 5 вересня 2018 р.....	169
4.3.1. Стан космічної погоди.....	169
4.3.2. Результати спостережень.....	170
4.3.3. Аналіз результатів спостережень.....	172
4.4. Землетрус 11 квітня 2019 р.....	176
4.4.1. Стан космічної погоди.....	176
4.4.2. Результати спостережень.....	176
4.4.3. Аналіз результатів спостережень.....	177
Висновки до розділу 4.....	179

РОЗДІЛ 5. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГЕОКОСМОСІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ВПЛИВ ТАЙФУНІВ.....	182
5.1. Загальні відомості.....	182
5.2. Ефекти тайфуну Hagibis.....	183
5.2.1. Загальні відомості про супертайфун Hagibis.....	183
5.2.2. Аналіз стану космічної погоди.....	184
5.2.3. Аналіз стану іоносфери .....	187
5.2.4. Результати похилого зондування іоносфери.....	188
5.2.5. Аналіз результатів спостережень.....	210
5.2.6. Акустико-гравітаційні хвилі.....	216
5.2.7. Інфразвукові хвилі.....	216
Висновки до розділу 5.....	217
РОЗДІЛ 6. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ГЕОКОСМІЧНІ БУРІ.....	219
6.1. Загальні відомості.....	219
6.2. Ефекти геокоосмічної бурі в нижній іоносфері.....	219
6.2.1. Засоби та методи.....	220
6.2.2. Стан космічної погоди.....	220
6.2.3. Процеси в нижній іоносфері.....	223
6.2.4. Аналіз отриманих результатів.....	225
6.3. Ефекти геокоосмічної бурі в середній іоносфері.....	230
6.3.1. Стан космічної погоди.....	230
6.3.2. Засоби та методи.....	233
6.3.3. Результати спостережень.....	234
6.3.4. Ефекти іоносферної бурі.....	242
6.3.5. Рух області відбиття.....	246
6.3.6. Параметри хвильових збурень.....	246
6.4. Ефекти геокоосмічної бурі в середній і зовнішньої іоносфері.....	246
6.4.1. Магнітна буря 25 вересня 1998 р.....	248
6.4.2. Магнітна буря 20–21 березня 2003 р.....	250



6.4.3. Магнітна буря 29–30 травня 2003 р.....	254
6.4.4. Магнітні бурі 7–10 листопада 2004 р.....	256
Висновки до розділу 6.....	265
РОЗДІЛ 7. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ Й ІОНОСФЕРІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ СТАРТИ РАКЕТ.....	267
7.1. Загальні відомості.....	267
7.2. Фізичні процеси в нижній іоносфері, які супроводжували старти ракет.....	267
7.3. Фізичні процеси в середній іоносфері, які супроводжували старти ракет.....	273
7.3.1. Старт ракет з космодрому Байконур.....	273
7.3.2. Старт ракет з космодрому Плесецьк.....	278
7.3.3. Старт ракет із космодромів США та Франції.....	278
7.3.4. Глобальні збурення при посадці космічних апаратів.....	284
7.3.5. Аналіз результатів.....	288
7.4. Фізичні процеси в геомагнітному полі, які супроводжували старти ракет.....	292
7.4.1. Загальні відомості.....	292
7.4.2. Обладнання та методики.....	292
7.4.3. Результати спостережень.....	293
7.4.4. Механізми утворення та поширення магнітних збурень.....	294
Висновки до розділу 7.....	297
ВИСНОВКИ.....	299
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	311
ДОДАТОК А.....	353

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АГХ – акустико-гравітаційні хвилі
- АПФ – адаптивне перетворення Фур'є
- ВНЧ – вкрай низькі частоти
- ВАП – варіації атмосферної погоди
- ВГХ – внутрішні гравітаційні хвилі
- ВКП – варіації космічної погоди
- ВП – варіації погоди
- ВПФ – віконне перетворення Фур'є
- ВЧ – високі частоти
- ДВЧ – дуже високі частоти
- ДЗЧ – доплерівське зміщення частоти
- ДНЧ – дуже низькі частоти
- ДС – доплерівський спектр
- ЗАІМ – Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера
- КА – космічний апарат
- МБ – магнітна буря
- МГД – магнітогідродинамічні
- НВЧ – надвисокі частоти
- ПЕВ – повний електронний вміст
- РІЗ – рухомі іоносферні збурення
- РКТ – ракетно-космічна техніка
- РФО – Радіофізична обсерваторія
- СМСМІАЗ – Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля
- СР – старт ракети
- ССА – системний спектральний аналіз
- СЧ – середні частоти
- УВЧ – ультрависокі частоти

ХНУ – Харківський національний університет

ШСЗ – штучний супутник Землі

$A$  – амплітуда хвилі

$D$  – відстань від джерела до середини радіотраси

$f_{Da}$  – доплерівське зміщення частоти

$N$  – концентрація електронів

$q$  – відношення сигнал/шум

$R$  – протяжність радіотраси

$v$  – введена швидкість приходу сигналу

$T$  – період хвиль

$\Delta N = N/N_0$  – відносне збурення концентрації електронів

$\Delta T$  – тривалість сигналу

$\Delta t$  – час запізнення

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В останні десятиліття верхня атмосфера та геокосмос стали середовищем існування людства. У геокосмосі функціонує більше тисячі штучних супутників Землі. Атмосфера та геокосмос використовуються в якості радіоканалів для радіохвиль практично всіх діапазонів, починаючи від одиниць кілогерц і закінчуючи гігагерцами. Функціонування систем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування суттєво залежить від стану атмосфери та геокосмосу, що визначають стан атмосферно-космічних радіоканалів. Останнє в основному визначається процесами на Сонці, частково процесами в далекому космосі, а також процесами на Землі. Під дією таких процесів виникає взаємодія підсистем в системах Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Автор [1–5] обґрунтував, що системи СМСМІАЗ і ЗАІМ відносяться до відкритих динамічних стохастичних і нелінійних систем, яким властиві нетривіальні процеси, такі, як виникнення детермінованого хаосу, самоорганізація, тригерність і т.п. Перебудова взаємодії підсистем відбувається під дією високоенергетичних джерел різної фізичної природи на одну з підсистем. До природних джерел належать сонячні бурі, падіння великих космічних тіл (метеороїдів), грози, погодні фронти, урагани (тайфуни), смерчі (торнадо), виверження великих вулканів, потужні землетруси та ін. Автор [1–5] обґрунтував, що енергетика ряду техногенних процесів може бути сумірна з енергетикою природних процесів. Це означає, що стан атмосфери і геокосмосу, тобто стан атмосферно-космічної погоди формується як природними, так і техногенними джерелами енерговиділення. До останніх відносяться старти та польоти космічних апаратів, падіння великих космічних виробів, потужні вибухи, вплив

потужним радіо- й акустичним випромінюванням, інжекція газів, плазми та хімічних реагентів та ін.

Важливо, що реакція атмосфери та геокосмосу суттєво залежить від їх стану. Вивченню такої реакції присвячена велика кількість наукових робіт, виконаних у різних країнах. Проте, вивчення реакції систем СМСМІАЗ і ЗАІМ на вплив високоенергетичних джерел залишається актуальною науковою проблемою. Справа в тому, що немає двох повністю подібних реакцій на дві подібні дії. Є загальні ланки в реакції, але є і відмінності. Прояви впливу високоенергетичних джерел на атмосферу та геокосмос залежать від положення в циклі сонячної активності, сезону, часу доби, місця спостереження, а також від засобів спостереження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором самостійно або з його науковим консультантом протягом 1996–2020 рр. відповідно до науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Основними з них є такі.

1. Дослідження збурень середньоширотної іоносфери (1997–1999 рр.), номер держреєстрації 0197U018347 (науковий керівник).

2. Дослідження впливу потужних джерел збурень на атмосферно-іоносферні електродинамічні зв'язки (2000–2002 рр.), номер держреєстрації 0100U003336 (науковий керівник).

3. Дослідження динаміки і електродинаміки мезосфери, нижньої термосфери та іоносфери (2003–2005 рр.), номер держреєстрації 0103U004239 (науковий керівник).

4. Радіофізичні та магнітометричні ефекти впливу на геокосмос високоенергетичних джерел (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0106U001549 (виконавець напрямку).

5. Дослідження електродинаміки електрично активної середньої атмосфери (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0106U001551 (науковий керівник).

6. Радіофізичні та магнітометричні ефекти в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0109U000554 (виконавець напрямку).

7. Просторово-часова структура збурень в електрично активній мезосфері (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0109U000534 (науковий керівник).

8. Фізичні ефекти та екологічні наслідки в геокосмосі, викликані стартами ракет, на фоні природних високоенергетичних процесів (2012–2014 рр.), номер держреєстрації 0112U002153 (виконавець напрямку).

9. Мезосфера як новий активний елемент у глобальному атмосферному електричному ланцюзі (2012–2014 рр.), номер держреєстрації 0112U001064 (науковий керівник).

10. Глобальні збурення, стимульовані космічною діяльністю та потужним радіовипромінюванням віддалених радіосистем і їх екологічні наслідки (2013–2015 рр.), номер держреєстрації 0115U000463 (виконавець напрямку).

11. Моделювання динамічних процесів в іоносфері та геомагнітному полі в період аномального 24-го циклу сонячної активності (2015–2017 рр.), номер держреєстрації 0115U000467 (виконавець напрямку).

12. Дистанційний вплив потужного радіовипромінювання на канали телекомунікацій та електронну апаратуру (2016–2018 рр.), номер держреєстрації 0116U000822 (виконавець напрямку).

13. Розробка методів аналізу короткочасних і надширокосмугових процесів на основі нетрадиційних лінійних і нелінійних інтегральних перетворень (2017–2019 рр.), номер держреєстрації 0117U004872 (виконавець напрямку).

14. Розробка глобальної напівемпіричної моделі електронної концентрації іоносфери поточного часу (2017–2019 рр.), номер держреєстрації 0117U004868 (науковий керівник).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження основних фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, що супроводжували вплив на навколоземне середовище падіння Челябінського метеороїда, геокосмічних бур, тайфунів, землетрусів, стартів великих ракет, польотів космічних апаратів і потужного наносекундного радіовипромінювання, важливих для поширення радіохвиль і функціонування радіоканалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв’язуються наступні задачі:

- Розвиток основ системної парадигми стосовно об’єктів ЗАІМ і СМСМІАЗ.
- Теоретичне дослідження основних фізичних процесів, викликаних падінням Челябінського метеороїда.
- Експериментальні дослідження основних фізичних процесів, викликаних падінням Камчатського метеороїда.
- Експериментальні дослідження динамічних процесів у мезосфері.
- Експериментальні дослідження впливу землетрусів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу потужних тайфунів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу геокосмічних бур на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу стартів ракет і польотів космічних апаратів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.

**Об’єкт дослідження** – верхня атмосфера та геокосмос.

**Предмет дослідження** – фізичні процеси в атмосферно-космічних радіоканалах, зумовлені впливом на середовище високоенергетичними джерелами.

**Методи досліджень.** У дисертації використовуються відомі радіофізичні методи дистанційного радіозондування – методи часткових відбиттів, метод доплерівського зондування, метод багаточастотного багатотрасового похилого зондування, метод некогерентного розсіяння, а також магнітометричний метод. При обробці результатів радіофізичних вимірювань використовувалися методи статистичної радіофізики та математичної статистики, спектральний аналіз, статистичний аналіз, кореляційний аналіз. При проведенні теоретичних досліджень використовувалися аналітичні та числові методи, а також фізичне моделювання.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Проведено теоретичні дослідження та виконано числові оцінки основних параметрів фізичних процесів у системі ЗАІМ, викликаних падінням найбільшого за останні 100 років космічного тіла – Челябінського метеороїда. Визначено кількісні значення параметрів збурень, що виникли в системі ЗАІМ.

2. За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлені іоносферні збурення, що послідували за падінням Камчатського метеороїда масою 1.41 кт і розміром близько 9.4 м. Знайдено три групи збурень: що мали удавані швидкості поширення 1.9–2.9 км/с, 620–770 м/с та 310–500 м/с.

3. Вперше для українського регіону наведені систематичні спостереження за динамікою мезосфери за допомогою середньочастотного (частота  $\sim 2$  МГц) радара і встановлені основні добові та сезонні залежності величини (10–80 м/с), напрямку ( $140$ – $180^\circ$ ) зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості. Значення турбулентної швидкості становило 2–6 м/с. Амплітуда квазіперіодичних варіацій в діапазоні періодів 10–120 хв не перевищувала 8 м/с.



4. Вперше продемонстрована можливість спостереження на відстанях  $\sim 1 - 2$  тис. км динамічних процесів в іоносфері, що супроводжували землетруси помірної сили ( $M \approx 5.9-6.5$ ). Встановлено, що сейсмічна активність супроводжується аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше  $1 - 2$  тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період  $4 - 5$  хв) і в діапазоні  $15-30$  хв, які генеруються поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу. За оцінками, амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової й атмосферної гравітаційної хвиль була  $\sim 0.15 - 0.31\%$  і  $7 - 8\%$  відповідно. Тривалість цугів коливань була в межах  $24 - 55$  хв. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень, які відповідають швидкостям сейсмічних і акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі.

5. Вперше за допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію супертайфунів. Дія супертайфуну супроводжувалася підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувалися хвильові процеси з періодом від  $12-15$  до  $60-150$  хв. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалася за допомогою атмосферних гравітаційних хвиль. Найбільший вплив на іоносферу справлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику. Під дією хвильових процесів висота відбиття радіохвиль коливалася в межах  $\pm(30-50)$  км. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів у F-області іоносфери змінювалася від  $10 - 12\%$  для періодів  $\sim 20$  хв до  $30 - 60\%$ , для періодів  $\sim 60 - 120$  хв.

6. Встановлено, що під час геокосмічних бур характеристики радіохвиль в

діапазоні частот 5–10 МГц зазнають суттєвих збурень у всіх областях іоносфери. Вперше за допомогою багаточастотних багатотрасових (до 14 радіотрас довжиною ~1–2 тис. км) вимірювань виявлено, що геокосмічні бурі призводять до значного (до 1 Гц і більше) розширення доплерівських спектрів, підсилення багатомодовості, суттєвим (до  $\pm 1$  Гц і більше) аперіодичним і квазіперіодичним варіаціям параметрів іоносфери. Відносна амплітуда квазіперіодичних змін концентрації електронів у іоносфері досягала десятків процентів, а їх період становив ~10–120 хв.

7. Проведено багаторічні спостереження за збуреннями характеристик радіохвиль і параметрів іоносфери та геомагнітного поля, що виникають при стартах ракет і польотах космічних апаратів. Встановлено, що при цьому в глобальних масштабах (на відстанях ~1–10 тис. км) в атмосфері та геокосмосі виникають реєстровані збурення, що поширюються у вигляді акустико-гравітаційних хвиль (швидкість 0.3–0.8 км/с), повільних МГД хвиль (швидкість ~1–10 км/с) і гіротропних хвиль (швидкість ~10–100 км/с). Тривалість збурень становить від десятків хвилин до декількох годин.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в отриманні кількісних значень збурень характеристик радіохвиль і параметрів атмосферно-іоносферного радіоканалу під дією високоенергетичних джерел (падінь метеороїдів, геокосмічних бур, тайфунів і землетрусів), що визначають ефективність функціонування систем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування.

Значна частина результатів дисертації увійшла в підсумкові звіти за науково-дослідними роботам кафедри космічної радіофізики, для яких отримані акти про впровадження результатів досліджень.

**Особистий внесок здобувача** полягає в постановці задач дослідження, аналізі стану космічної погоди, аналізі стану іоносфери, аналізі результатів

спостережень і вимірювань, проведенні числових розрахунків, написанні відповідних розділів у статтях і тезах, участі в обговоренні отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Представлені в роботі результати доповідалися на 36 міжнародних і національних конференціях, основні з яких наступні:

– Международный семинар «Физика космической плазмы» (Киев, Украина, 6–10 июня 1993).

– IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (Baltimore, Maryland, 21 – 26 July 1996).

– International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kharkov, Ukraine, 2-5 June 1998, 2000).

– Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere (Suzdal, Russian Federation, 26 – 29 August 1998).

– 24th General Assembly of the European Geophysical Society (The Hague, Netherlands, 19–23 April 1999).

– XXVI<sup>th</sup> General Assembly of the URSI (Toronto, Canada, 13–21 August 1999).

– XIX Всероссийская конференция «Распространение радиоволн» (Казань, Российская Федерация, 22–25 июня 1999)

– «Астрономия в Украине–2000 и перспектива» (Київ, Україна, 5–8 июня 2000).

– XXVII General Assembly of the international union of Radio Science (Maastricht, Netherlands, 17 – 24 August 2002).

– XX Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2–4 июля 2002).

– Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству (Владимир, Российская Федерация, 22–26 сентября 2003).

– Международная конференция, посвященная 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ (Томск, Российская Федерация, 29 сентября – 4 октября 2003).

– Міжнародна наукова конференція. Каразінські природознавчі студії. (Харків, Україна, 14–16 червня 2004).

– Международная конференция по физике солнечно-земных связей (Иркутск, Российская Федерация, 20 – 25 сентября 2004).

– 35th COSPAR Scientific Assembly. (Paris, France, 18–25 July 2004).

– Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям (Кацивели, Крым, Украина, 2002; Кацивели, Крым, 15 – 21 сентября 2003; Понизовка, Крым, Украина, 2004).

– 16th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 11–15 September 2006).

– Characterising the Ionosphere Meeting (Neuilly-sur-Seine, France, 12–16 June 2006).

– 16th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 11–15 September 2006).

– 36th COSPAR Scientific Assembly (Beijing, China, 16–23 July 2006).

– Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science “First Results from the International Heliophysical Year 2007”. Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences (Sozopol, Bulgaria, 02 – 06 June 2008).

– Українська конференція з космічних досліджень (Крым, Евпатория, Украина, 1 – 7 сентября 2008; Odesa, Ukraine, 24 – 28 August 2015; Odesa, Ukraine, 21–25 August 2017; Київ, Україна, 17 – 20 вересня 2018).

– 2009 19th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 14–18 September 2009).

– Первая украинская конференция «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства» (Харьков, Украина, 25 – 27 сентября 2012).

- 9-th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, Russian Federation, October 8 – 12 2012).
- 23rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9—13 September 2013).
- IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) (Odessa, Ukraine, 16–20 September 2013).
- I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры (Харьков, Украина, 24 – 25 октября 2013).
- Міжнародна конференція в рамках IX Всеукраїнського фестивалю науки присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всехсвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна (Київ, Україна, 25–29 травня 2015).
- Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». (Умань, Україна, 23–24 травня 2018).
- Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 24–27 May 2016, 29 May– 01 June 2018; 28 May–31 May 2019; 27 – 29 May 2020).
- XVII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 23–27 May 2017).
- XIII International Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, 24–27 October 2017).
- 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Odessa, Ukraine, 4 – 7 September 2018).
- 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Lviv, Ukraine 02–06 July 2019).
- Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science (Kyiv, Ukraine, 26–30 August 2019).
- 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (Kharkiv, Ukraine, 22–27 June 2020).

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковані у 111 наукових працях, серед яких 9 – статті у наукових фахових виданнях України, 14 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (з них 10 – статті у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 15 – статті, що додатково відображають зміст дисертації, 73 – матеріали доповідей на конференціях (зокрема 16 тез, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі Вступу, семи розділів, Висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 379 сторінок, основного тексту – 269 сторінок. Робота ілюстрована 86 рисунками, 31 таблицею. Список використаних джерел містить 391 найменування.

Автор вдячний науковому консультанту, завідувачу кафедри космічної радіофізики, доктору фізико-математичних наук, професору Леоніду Феоктистовичу Чорногору, співавтору майже всіх основних публікацій автора, за вклад його енциклопедичних знань в дослідження, описані в цій дисертаційній роботі.

Автор висловлює подяку всім своїм співавторам і співробітникам Кафедри космічної радіофізики та Радіофізичної обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, які внесли вагомий вклад в результати досліджень, наведених в дисертації. Особливо хочеться відзначити вклад К. П. Гармаша, Л. С. Кострова, С. І. Мартиненка, С. В. Панасенка, В. А. Подноса, О. Ф. Тирнова, А. М. Цимбала.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

#### 1.1 Короткі відомості про об'єкт дослідження

Земля й оточуючий її простір складається з геосфер. Усередині планети виділяють три внутрішні геосфери – ядро, мантію і земну кору (літосферу). Товщина літосфери коливається в межах від 10 км до 60 км. За сейсмічні процеси відповідає верхня геосфера, іменована тектоносферою. До зовнішніх геосфер відносять атмосферу, іоносферу та магнітосферу. У свою чергу атмосфера складається з тропосфери, стратосфери, мезосфери і термосфери. В іоносфері виділяють області – D, E та F. Області складаються з шарів C, D, E, E<sub>s</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> та ін. Складну структуру має і магнітосфера.

Звісно, поділ на геосфери є умовним. Насправді, Земля й оточуючий її простір являють собою єдине утворення, що включає внутрішні і зовнішні геосфери.

Нижня межа навколоземного космічного простору (геокосмосу) лежить на висоті  $\sim 100$  км, а на відстані  $R \approx 10 R_e$  ( $R_e$  – радіус Землі) геокосмос поступово переходить у міжпланетний простір. З підвітряного боку цей розмір близький до  $100R_e$ .

##### 1.1.1 Загальні відомості

Сонце – головне джерело енергії в Сонячній системі. Сонце в основному визначає процеси в системі СМСМІАЗ. Земля отримує від Сонця енергію у вигляді електромагнітного і корпускулярного випромінювань, а також у вигляді сонячного вітру [6].

Електромагнітне випромінювання Сонця спостерігається в діапазоні довжин хвиль  $\lambda$  від  $\sim 10^{-10}$  до 10 м. Максимум енергії випромінювання припадає на  $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$  м.

Вплив електромагнітного і корпускулярного випромінювань Сонця, а також сонячного вітру викликає взаємодію підсистем і комплекс процесів на Землі (рис. 1.1, 1.2), які вивчені в даний час недостатньо [7, 8]. З рис. 1.1 і 1.2 видно, що нестационарні процеси на Сонці (сонячні бурі) служать причиною більшості явищ в системі СМСМІАЗ. Крім того, вони призводять до метеорологічних і біологічних ефектів.

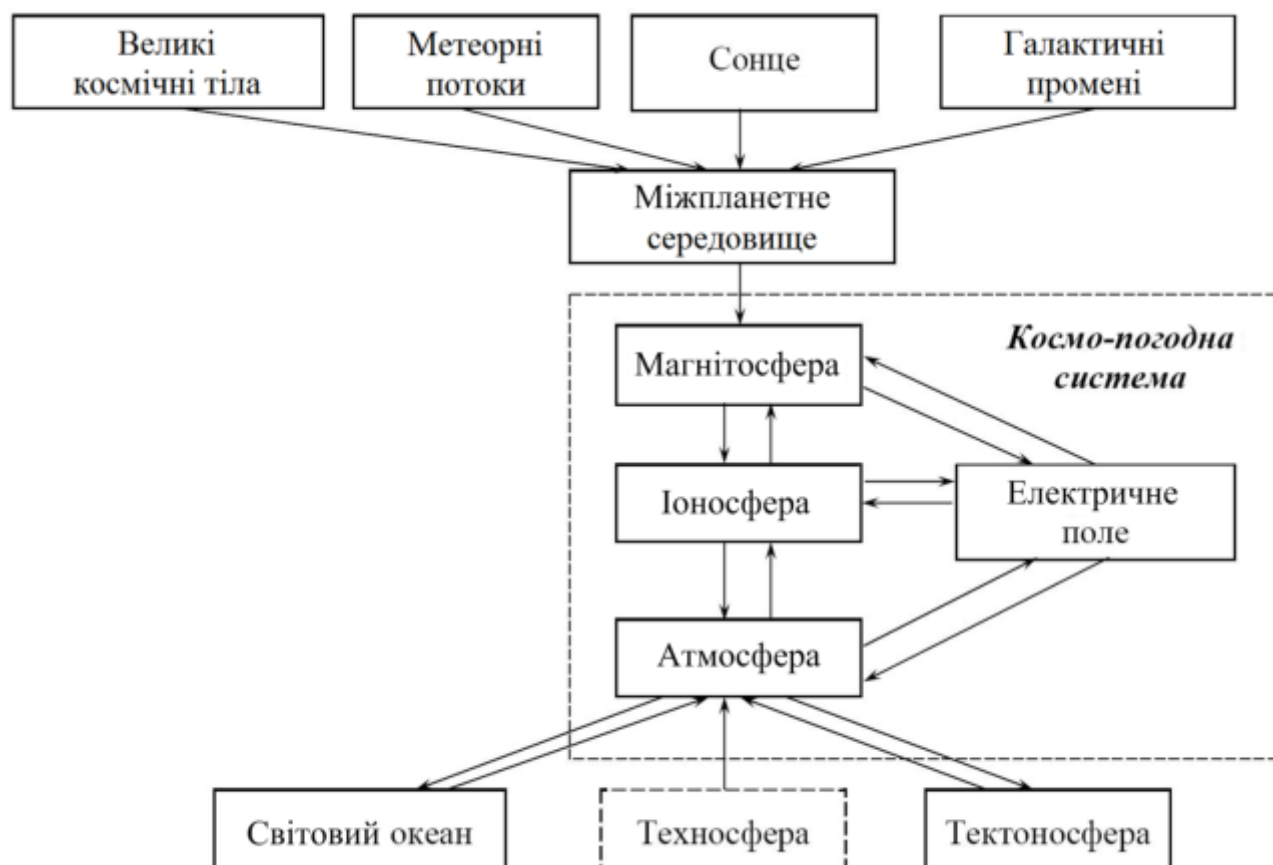


Рис. 1.1 Будова системи СМСМІАЗ [1–5]

Параметри електромагнітного і корпускулярного випромінювань Сонця змінюються під час сонячних спалахів, які викликають комплекс первинних і вторинних процесів на Землі. До первинних процесів відносяться зростання концентрації електронів в іоносфері, додатковий нагрів геокосмосфери, зміна прозорості атмосфери на висотах, де ефективно поглинаються сонячні космічні промені, та ін. Перелік вторинних процесів набагато ширше. Сюди відносять генерацію періодичних і аперіодичних варіацій геомагнітного і геоелектричного



полів, збільшення поглинання космічних радіошумів, ефект Форбуша, генерацію акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) і багато інших.

До більш значущих наслідків призводять викиди корональної маси, що викликають підсилення інтенсивності та швидкості сонячного вітру, „бомбардування” геокосмосу магнітними хмарами і плазмоїдами сонячного походження. Вплив цих факторів триває від 10 до 70 год. В результаті такого „бомбардування” помітно деформується магнітосфера і до 1–2 % змінюється індукція геомагнітного поля (настає магнітна буря), нагрівається термосфера і іоносфера, в іоносфері в 2–10 разів зменшується або суттєво (на ~100 %) збільшується концентрація заряджених частинок, змінюється швидкість хімічних реакцій і т. д. Подібні процеси в іоносфері іменуються іоносферними бурями.

Енергія збуреного сонячного вітру і магнітних хмар з магнітосфери по силових лініях проникає в атмосферу у вигляді електричних полів, потоків частинок, плазми і, в кінцевому підсумку, тепла. Джоулева дисипація магнітосферних електричних полів і гальмування високоенергійних частинок призводять до нагрівання атмосфери, збуренню системи термосферних вітрів, генерації збурень хвильової природи, перебудові хімічних реакцій, варіацій атмосферного електричного поля і т. п. Сукупність цих процесів, що мають значну енергетику, названі атмосферними бурями [2, 4, 9, 10]. Збурення параметрів геоелектричного поля можуть бути настільки суттєвими, що в цьому випадку має сенс говорити про електричну бурю [2, 4, 9, 10]. Магнітна, іоносферна, атмосферна і електрична бурі являють собою прояв єдиного процесу – геокосмічної бурі [2, 4, 9, 10]. Інакше кажучи, геокосмічна буря – синергетично взаємодіючі бурі в магнітному полі, іоносфері, атмосфері й електричному полі магнітосферно – іоносферно – атмосферного походження [2, 4, 9, 10].

### **1.1.2 Процеси в системі ЗАІМ**

Вище перераховані процеси, відповідальні за перенесення речовини та випромінювань „зверху”. Вони в основному формують стан космічної погоди. Стан

звичайної погоди, як відомо, визначається переважно процесами в системі океан – суша – атмосфера [11]. Певною мірою на погоду впливають процеси на Сонці, проте це питання в даний час вивчено недостатньо [12–17].

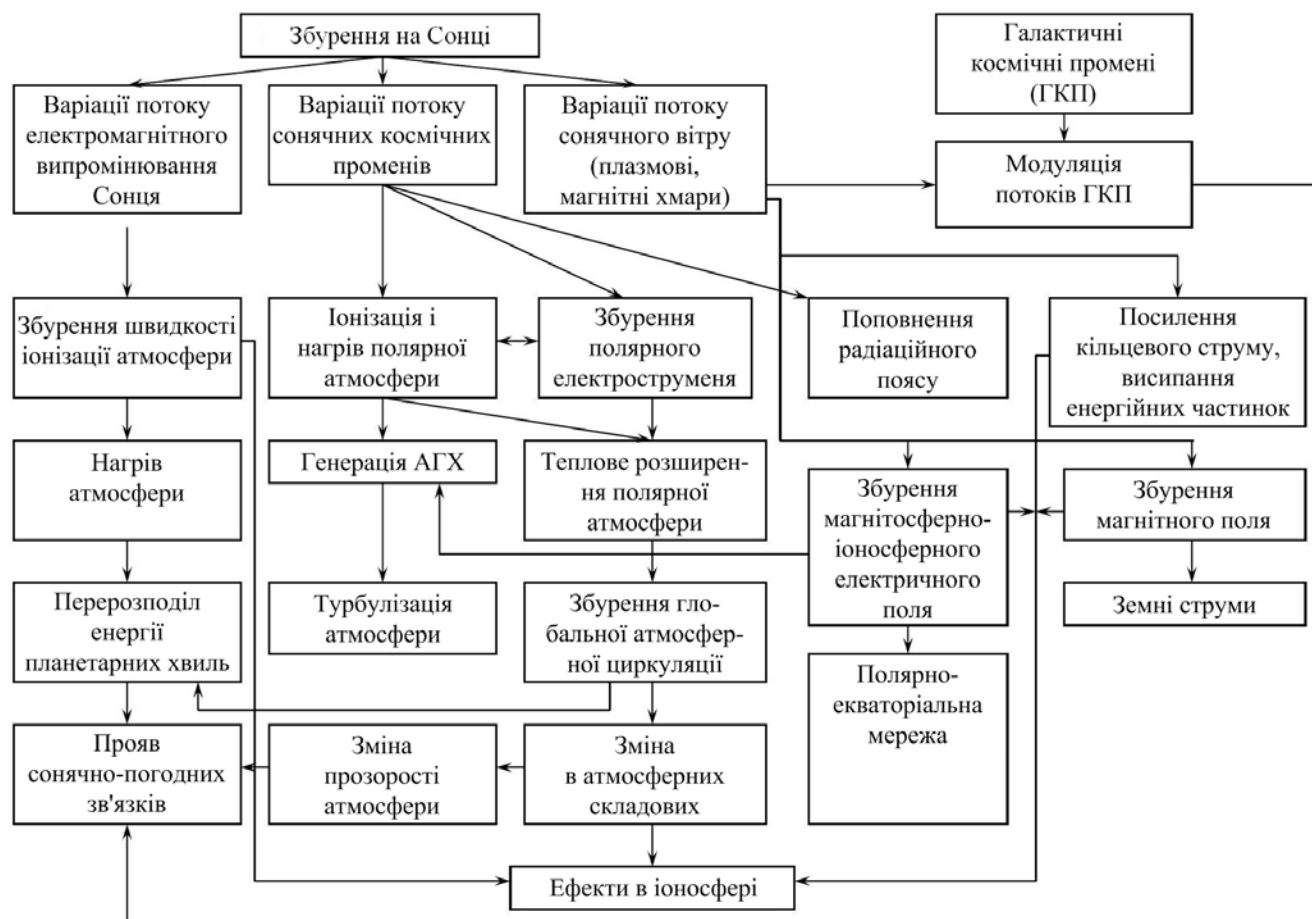


Рис. 1.2 Схема взаємодії підсистем в системі СМСМІАЗ (АГХ – акустико-гравітаційні хвилі) [1–5]

Як показано в роботах [2, 4, 9, 10, 18, 19, 21], не можна не враховувати потоки випромінювань і речовини „знизу” і, зокрема, їх вплив на погоду та процеси в геокосмосфері, а значить, і на атмосферно-космічні радіоканали. Такі потоки виникають при землетрусах, виверженнях вулканів, грозах, енергійних атмосферних процесах і т. д.

В останні десятиліття стало ясно, що на стан системи ЗАІМ помітно впливає низка процесів техногенного походження. Справа в тому, що енергоозброєність людства зростає настільки, що потужність і енергія рукотворних об'єктів, виробів і

процесів досягла, а в ряді випадків і перевершила відповідні параметри багатьох природних процесів і джерел [18–37]. Тому потужні техногенні впливи на підсистеми ЗАІМ також повинні братися до уваги.

### 1.1.3 Процеси в системі СМСМІАЗ

Космічні і частково земні чинники формують стан космічної погоди [2, 4, 9, 10].

Космічна погода – фізичний стан геокосмосу (тобто верхньої атмосфери, іоносфери та магнітосфери) в заданому інтервалі часу [2, 4, 9, 10].

Космічний клімат – усереднений на досить великому часовому інтервалі стан космічної погоди.

Останнім часом з’явилися підстави стверджувати, що обидві погодні системи пов’язані між собою [2, 4, 38, 39]. Це означає, що на системи ЗАІМ і СМСМІАЗ спільно (синергетично) впливають варіації як атмосферної, так і космічної погоди.

Через складність процесів, багатофакторності та синергетичності впливів у системі Космос–Земля канали взаємодії варіацій атмосферної погоди (ВАП) та варіацій космічної погоди (ВКП) вивчені недостатньо. Попереднім дослідникам бракувало системного підходу до вивчаємої проблеми. Для виявлення механізмів і каналів впливу ВАП і ВКП необхідний системний підхід до системи Космос – Земля в цілому та до системи ЗАІМ.

Головною причиною варіацій космічної погоди, а почасти й варіацій атмосферної погоди є нестационарні процеси на Сонці (сонячні бурі). До них відносяться спалахи електромагнітного та корпускулярного випромінювань, викиди корональної маси, вплив ударної хвилі в сонячному вітрі, бомбардування магнітосфери плазовими і магнітними хмарами сонячного походження.

Схема взаємодії підсистем при збуреннях на Сонці показана на рис. 1.2 [2, 4]. З рис. 1.2 видно вплив варіацій потоку сонячного вітру (сонячної активності) на прояв сонячно-кліматичних зв’язків (взаємодію двох погодних систем). Проміжною ланкою, зокрема, служить модуляція потоків ГКП.

Нестаціонарні процеси на Сонці та, перш за все, викиди корональної маси викликають геокоосмічні бурі.

Іншими, менш інтенсивними або більш рідкісними причинами ВКП і ВАП космічного походження є метеорні потоки і падіння досить великих космічних тіл [2, 4, 9, 10].

Метеорні потоки привносять в систему речовину з космосу, формують в іоносфері пилову плазму, нагрівають верхню атмосферу, створюють додаткову іонізацію і є джерелами АГХ і варіацій електричного і магнітного полів.

Падіння великих космічних тіл здатні змінити не тільки космічну погоду, але й суттєво вплинути на космічний клімат, викликати ефект «астероїдної зими» кардинально модифікувати біосферу і навіть її знищити. Подібні катаклізми в історії Землі траплялися неодноразово. Чим більше розмір космічного тіла, тим рідше такі тіла стикаються із Землею. Наприклад, тіла, подібні Челябінському, падають на Землю один раз в 65–80 років.

Падіння великих космічних тіл супроводжуються генерацією збурень електричного, магнітного, електромагнітного полів, а також АГХ.

## **1.2 Високоенергетичні джерела фізичних процесів в атмосфері та геокоосмосі**

У роботах [2, 4, 9, 10, 18, 21] розглянуто енергетику процесів у системах СМСМІАЗ і ЗАІМ. Окремо опишемо енергетику природних і техногенних процесів (табл. 1.1 і табл. 1.2).

Важливими для фізики системи СМСМІАЗ (СМСМІАЗБ) є, зокрема, нестаціонарні процеси на Сонці (сонячні бурі). Бурі супроводжуються спалахами і викидами корональної маси – потужними проявами сонячної активності.

### 1.2.1 Енергетика сонячних спалахів

Енергія спалахів досягає  $10^{25}$  Дж, а потужність –  $10^{22}$  Вт. На орбіті Землі спалахам відповідають значення порядку  $10^{16}$  Дж,  $10^{13}$  Вт (для площі перерізу Землі  $S_e \approx 10^{14} \text{ м}^2$ ) та  $10^{18}$  Дж,  $10^{15}$  Вт (для площі перерізу магнітосфери  $S_m$ ). Складові цих енергетичних характеристик для сильного спалаху наведені в табл. 1.3. Для слабого спалаху (або субспалаху) ці параметри на 2–3 порядки менше.

### 1.2.2 Енергетика викидів корональної маси

Маса речовини, що викидається становить  $10^{12}$ – $10^{13}$  кг, швидкість –  $(1\text{--}3) \cdot 10^6$  м/с. Кінетична енергія викидів порядку  $10^{24}$ – $10^{26}$  Дж. При тривалості процесу  $10^3$ – $10^4$  с його потужність близька до  $10^{20}$ – $10^{23}$  Вт [1–5, 9]. Як і слід було очікувати, енергетика викидів корональної маси суттєво перевершує енергетику інших процесів, які супроводжують сонячну бурю.

Сонячні бурі в околиці Землі викликають геокосмічні бурі. Енергетичні характеристики геокосмічної бурі наведені в табл. 1.4 [1–5, 9]. З табл. 1.4 видно, що в процесі бурі найбільше змінюється енергія електричного поля у всіх зовнішніх оболонках Землі. Суттєво також варіюється теплова енергія іоносфери. Магнітні збурення зазвичай невеликі, але їх роль може бути значною.

### 1.2.3 Енергетика сейсмічних процесів

Розглянемо енергетику сейсмічних процесів [1–5, 9, 10]. Енергія землетрусу (ЗТ) визначається густиною сейсмічної енергії  $\varepsilon_e$  і об'ємом осередку землетрусу  $V_{eq}$  [9, 10, 40]:

$$E_{eq} = \varepsilon_e V_{eq}.$$

В середньому  $\varepsilon_e \approx 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>, для найсильніших землетрусів  $V_{eq} \approx 10^{16}$  м<sup>3</sup>. При цьому  $E_{eq} \approx 10^{19}$  Дж. Їм відповідає магнітуда  $M_e \approx 8$ .

Таблиця 1.1

## Параметри природних процесів [1–5, 9]

Джерело	Енергія, Дж	Потужність, Вт	Тривалість дії, с	Примітка
Викиди корональної маси	$10^{24} - 10^{26}$	$10^{20} - 10^{23}$	$10^3 - 10^4$	Маса речовини – $10^{12}-10^{13}$ кг, швидкість – $(1-3) \cdot 10^6$ м/с
Оптичне випро- мінювання Сонця	$10^{22}$	$10^{17}$	$10^5$	Протягом доби
Незбурений сонячний вітер	$10^{17}$	$10^{12}$	$10^5$	Те ж
Метеорит	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{12} - 10^{15}$	1	Вплив на атмосферу
Астероїд	$10^{21} - 10^{30}$	$10^{23} - 10^{30}$	$10^{-2} - 1$	Удар о Землю
Тунгуський феномен	$10^{16}$	$10^{15} - 10^{16}$	1 – 10	
Блискавка	$10^{10}$	$10^{10}$	1	
Глобальні вітри	$10^{20}$	$10^{15}$	$10^5$	Протягом доби
Циклон	$10^{19} - 10^{21}$	$2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^5$	
Ураган	$10^{18} - 10^{20}$	$10^{13} - 10^{15}$	$10^5$	Протягом доби
Торнадо	$10^{11} - 10^{13}$	$10^8 - 10^{10}$	$10^3$	
Вулкан	$10^{20} - 10^{21}$	$10^{15} - 10^{19}$	$10^2 - 10^5$	
Землетрус	$10^{19} - 10^{21}$	$10^{17} - 10^{18}$	$10^2 - 10^3$	
Цунамі	$10^{18} - 10^{20}$	$10^{16} - 10^{19}$	$10 - 10^2$	
Явище Ель Ніньо (Ла Ніна)	$10^{21} - 10^{22}$	$10^{14} - 10^{15}$	$(1 - 2) \cdot 10^7$	Підвищення (пониження) температури океану – 10 К, площа $5000 \times 1000$ км <sup>2</sup>
Лісова пожежа	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{12} - 10^{14}$	$10^5 - 10^6$	Площа $1000 \times 1000$ км <sup>2</sup>
Потік тепла з надр Землі	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{13}$	$10^5$	Протягом доби
Біосфера	$10^{19}$	$10^{14}$	$10^5$	Хімічна енергія протягом доби

У доісторичні часи, як свідчать розломи, могли мати місце ЗТ з  $V_{eq} \approx 10^{18}$  м<sup>3</sup>,  
 $\epsilon_e \approx 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> та  $E_{eq} \approx 10^{22}$  Дж ( $M_e \approx 10$ ).

Таблиця 1.2

## Параметри антропогенних джерел [1–5, 9]

Джерело	Енергія, Дж	Потужність, Вт	Тривалість дії, с	Примітка
Ядерний вибух: – одиночний; – всіх боєприпасів; – перспективний протиастероїдний	$4 \cdot 10^{17}$ $4 \cdot 10^{19}$ $4 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{24}$ $4 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{16}$ $4 \cdot 10^{28}$	$10^{-7}$ $10^3 - 10^4$ $10^{-7}$	Еквівалент 100 Мт. Глобальний ядерний конфлікт
Промисловий вибух	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{-3}$	Маса заряду 25 – 250 т
Аварія на АЕС	$10^{18}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^4 - 10^5$	Маса палива 100 т
Вибух великої ракети	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{10} - 10^{15}$	0.1 – 10	Маса палива 1000 т
Ракета, що стартує: – велика; – перспективна	$10^{12} - 10^{14}$ $10^{13} - 10^{15}$	$10^{10} - 10^{11}$ $10^{11} - 10^{12}$	$10^2 - 10^3$ $10^2 - 10^3$	Те ж. Маса палива $10^4 - 10^5$ т
коригувальний двигун в космосі	$10^7 - 10^9$	$10^6 - 10^7$	$10 - 10^2$	
Ядерна енергосистема космічного апарату	$10^{14}$	$10^9$	$10^5$	Протягом доби
Падіння космічного апарату: – великого; – перспективного	$10^{12} - 10^{13}$ $10^{14} - 10^{15}$	$10^9 - 10^{11}$ $10^{11} - 10^{13}$	$10^2 - 10^3$ $10^2 - 10^3$	Маса: 100 т $10^3 - 10^4$ т
ЛЕП	$10^{15}$	$10^{10}$	$10^5$	Протягом доби
Випромінювання радіосистем	$10^{12}$	$10^7$	$10^5$	Те ж
Метеотрон	$10^{12} - 10^{15}$	$10^9 - 10^{10}$	$10^3 - 10^5$	
Велика електростанція	$10^{14} - 10^{15}$	$10^9 - 10^{10}$	$10^5$	Протягом доби
Електростанції світу	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{12}$	$10^5$	Те ж
Світове енергоспоживання	$1.6 \cdot 10^{18}$	$1.6 \cdot 10^{13}$	$10^5$	Те ж

Розрахункова залежність енергії  $E$ , потужності  $P$ , тривалості  $\tau$  і магнітуди  $M_e$  в залежності від довжини  $L$  головної тріщини (деформації) наведена в табл. 1.5 [1–5, 21].

Таблиця 1.3

**Енергетичні характеристики складових сонячної бурі біля орбіти Землі  
[1–5, 9]**

Переносник	Енергія, Дж	Потужність, Вт
<b>Випромінювання<sup>1</sup></b>		
м'яке рентгенівське і ультрафіолетове	$(3 - 5) \cdot 10^{15}$	$(3 - 5) \cdot 10^{12}$
оптичне	$(1 - 3) \cdot 10^{15}$	$(1 - 3) \cdot 10^{12}$
жорстке рентгенівське	$(3 - 5) \cdot 10^{10}$	$(3 - 5) \cdot 10^7$
Гамма	$(1 - 3) \cdot 10^9$	$(1 - 3) \cdot 10^6$
Радіо	$10^8$	$10^5$
<b>Корпускули<sup>2</sup></b>		
електрони ( $\epsilon_e \geq 20$ кеВ)	$(3 - 5) \cdot 10^{17}$	$(3 - 5) \cdot 10^{14}$
протони ( $\epsilon_p \geq 20$ МеВ)	$(1 - 3) \cdot 10^{17}$	$(1 - 3) \cdot 10^{14}$
Викиди корональної маси	$10^{24} - 10^{26}$	$10^{20} - 10^{28}$
Ударні хвилі	$(1 - 3) \cdot 10^{18}$	$10^{15}$

<sup>1</sup>Відповідає площі перерізу Землі

<sup>2</sup>Відповідає площі перерізу магнітосфери

#### 1.2.4 Енергетика стартуючих ракет

Енергетика ракет, що стартують оцінюється за наступними співвідношеннями [18, 29, 41]:

$$E = Qm, \quad (1.1)$$

$$P = Q \frac{dm}{dt}, \quad (1.2)$$

де  $Q \approx 10^7$  Дж/кг – теплотворна здатність ракетного палива,  $m$  і  $dm/dt$  – його маса та витрата. Для найбільших ракет  $M \approx 2 \cdot 10^6$  кг,  $dm/dt \approx 1.5 \cdot 10^4$  кг/с. При цьому, як випливає з (1.1), (1.2),  $E \approx 2 \cdot 10^{13}$  Дж,  $P \approx 10^{11}$  Вт. Додамо, що для перспективних ракет ці параметри можуть бути на порядок більшими.



Таблиця 1.4

**Енергетичні характеристики геокоосмічних бур [1–5, 9]**

Область геокоосмосу	Енергія, Дж	Потужність, Вт	Тривалість, с	Відносні зміни енергії	Примітка
Магніто-сфера	$10^{16}$	$10^{12}$	$10^4$	$10^{-2}$	Енергія магнітного поля
	$10^8 - 10^{10}$	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Енергія електричного поля
Іоносфера	$10^{12}$	$10^8$	$10^4$	$\pm 1$	Теплова енергія
	$10^5 - 10^7$	$10 - 10^3$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	Енергія електричного поля
Термосфера	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{11} - 10^{13}$	$10^4 - 10^5$	$10^{-3} - 10^{-1}$	Теплова енергія
Приземна атмосфера	$10^{11} - 10^{12}$	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^5$	$1 - 10$	Енергія атмосферного електричного поля

Таблиця 1.5

**Розрахункові залежності енергії, тривалості, потужності та магнітуди ЗТ від його розміру (довжини) [1–5, 21]**

$L$ , км	1	3	10	30	100	300	500	1000	1200	1300
$E$ , Дж	$5.9 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$5.9 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^{13}$	$5.9 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^{16}$	$7.4 \cdot 10^{17}$	$5.9 \cdot 10^{18}$	$10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{19}$
$\tau$ , с	1	1.1	1.3	1.5	10	20	60	120	140	150
$P$ , Вт	$5.9 \cdot 10^9$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^{12}$	$1.1 \cdot 10^{13}$	$5.9 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{16}$	$4.9 \cdot 10^{16}$	$7.1 \cdot 10^{16}$	$8.7 \cdot 10^{16}$
$M_e$	3.3	4.3	5.3	6.3	7.3	7.6	8.7	9.3	9.47	9.54

Важливо відзначити, що для коригувальних двигунів  $dm/dt \approx 1-10$  кг/с,  $m \approx 10^3$  кг, тому  $E \approx 10^{10}$  Дж,  $P \approx 10^7-10^8$  Вт. Однак ці двигуни включаються безпосередньо в навколоземній плазмі і викликані в ній збурення можуть бути значно більше, ніж при спрацьовуванні основних (розгінних) двигунів в нижній атмосфері.

### 1.2.5 Енергетика падаючих космічних тіл

Розглянемо далі енергетичні характеристики космічних тіл, що вторгаються в атмосферу Землі. До них відносяться метеори, астероїди та комети. Їх кінетична

енергія залежить від початкової маси і швидкості космічного тіла:  $E = mv^2/2$ .  
Результати оцінок  $E$  і  $P$  наведені в табл. 1.6 [1–6, 18, 29, 41].

Таблиця 1.6

**Енергетичні характеристики космічних тіл в залежності від їх діаметра  
[1–6, 21]**

Параметр	$d, \text{ м}$						
	0.1	1	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
$E, \text{ Дж}$	$2.5 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^{14}$	$2.5 \cdot 10^{17}$	$2.5 \cdot 10^{20}$	$2.5 \cdot 10^{23}$	$2.5 \cdot 10^{26}$
$\Delta t, \text{ с}$	1	1	1	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10
$P, \text{ Вт}$	$2.5 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^{14}$	$2.5 \cdot 10^{19}$	$2.5 \cdot 10^{21}$	$2.5 \cdot 10^{23}$	$2.5 \cdot 10^{25}$

При розрахунках приймалося, що середня густина речовини космічного тіла дорівнює  $\rho_b \approx 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , відносна початкова швидкість близько 20 км/с. Крім того, вважалося, що при діаметрі  $d \leq 10 \text{ м}$  тіло повністю гальмується в атмосфері, де і виділяється вся енергія за час  $\Delta t \approx H/v \cos \chi$  ( $H \approx 10 \text{ км}$  – приведена висота атмосфери,  $\chi$  – кут між вертикаллю і траєкторією тіла). При  $d > 100 \text{ м}$  основне енерговиділення відбувається вибухово ( $\Delta t \approx 2d/v$ ) при зіткненні космічного тіла з планетою. Критичне значення  $d$  оцінюється з формули [1–6, 21, 41, 42]

$$\rho(z) \approx \frac{2d \cos \chi}{3C_x H} \rho_b. \quad (1.3)$$

Наприклад, при  $\rho(0) = 1 \text{ кг/м}^3$ ,  $H \approx 10 \text{ км}$ ,  $C_x \approx 1$  – коефіцієнт динамічного опору повітря,  $\cos \chi = 0.1\text{--}0.5$  з (1.3) маємо  $d \approx 10\text{--}50 \text{ м}$ .

### 1.3 Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних землетрусами

#### 1.3.1 Загальні відомості про землетруси

Як відомо, землетрус супроводжується підземними поштовхами і коливаннями земної поверхні, що виникають внаслідок раптових зміщень і розривів в тектоносфері (земній корі або верхній частині мантії) [43, 44].

Землетруси виникають в результаті вивільнення пружної енергії, накопиченої у епіцентрі. Довжина епіцентру може досягати порядку 1000 км, ширина – порядку сотень кілометрів, а глибина – десятків–сотень кілометрів. Вивільнення енергії супроводжується руйнуванням земних порід і генерацією сейсмічних хвиль, що поширюються на відстані порядку 1000–10000 км [1–5, 9, 10, 21].

Приклади найсильніших ЗТ з магнітудою  $M_e \geq 9$  й їх параметрів наведені в табл. 1.7.

Енергія і потужність найсильніших ЗТ досягає  $\sim 10^{19}$  Дж і  $10^{17}$  Вт відповідно. Ці ж величини для акустичного (інфразвукового) випромінювання ЗТ на 3–4 порядки менше. Вельми значна і енергетика електромагнітного випромінювання у епіцентрі ЗТ (табл. 1.8) [1–5, 9, 18].

Ще в 1960-і рр. надійно встановлено, що сильні ЗТ впливають на атмосферу і іоносферу [45–48]. Потім було показано, що ЗТ супроводжуються збуреннями магнітосфери, зокрема, варіаціями геомагнітного поля і висипанням енергійних частинок з радіаційного поясу Землі [49–51]. Важливо, що ефекти у всіх підсистемах виникають не тільки після завершених ЗТ, а й на стадії їх підготовки [52–60]. Тому в кінці ХХ-го століття було поставлене питання про розробку систем попередження ЗТ з використанням комплексу передвісників у всій системі ЗАІМ [57–60]. Можливість вирішення надзвичайно складної проблеми прогнозування ЗТ представляється реальною, хоча до кінця не зрозумілі механізми генерації передвісників ЗТ в системі ЗАІМ і, особливо, в геокосмосі. Вважається, що за передачу збурень з тектоносфери в зовнішні геосфери відповідальні квазістатичні електричні і магнітні поля, електромагнітні хвилі в досить широкому діапазоні частот (див. табл. 1.8), а також акустико-гравітаційні хвилі [1–5, 9, 10]. В роботі [61] розроблено електродинамічну модель іоносферних передвісників ЗТ, яка пояснює майже весь комплекс явищ, що спостерігаються. Системний підхід до механізмів генерації іоносферного передвісника здійснений в роботі [62], теорія магнітного передвісника наведена в роботі [63].

Таблиця 1.7

**Відомості про найсильніші землетруси та їх наслідки [1–5, 9, 10]**

$M_e$	Дата, час, місце	Число жертв	Число пораних	Число бездомних	Економічні збитки
9.5	22.05.1960 19:11:14 UTC Чилі	1655	3000	2000000	675 млн дол.
9.2	28.03.1964 03:36 UTC Принц Уільям, Аляска, США	128			311 млн дол.
9.1	26.12.2004 00:58:53 UTC Суматра і Андаманські о-ва, Індонезія	228000		1700000	
9.0	11.03.2011 05:46:23 UTC Поблизу о. Хонсю, Японія				
9.0	04.11.1952 16:58:26 UTC п-в Камчатка, Росія	—	—	—	1 млн дол.
9.0	13.08.1868 21:30 UTC Аріка, Перу (зараз Чилі)	25000			

Розмір епіцентру ЗТ рідко перевищує 100–1000 км (або 1–10°). У той же час розмір збуреної зони в геокосмосі, як показали спостереження на супутниках, має три характерних масштаба [57].

Таблиця 1.8

**Енергетичні характеристики полів сейсмічного походження [1–5, 9, 10]**

Поле	Енергія, Дж	Потуж- ність, Вт	Тривалість, с	Примітка
Електро- магнітне: $f \leq 10$ Гц	$10^{10} - 10^{11}$	$10^8$	$10^2 - 10^3$	Досягає іоносфери і магнітосфери.  Те ж.  Сильно послаблюється в літосфері
$f = 10^3 - 10^4$ Гц	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{11}$	$10^2 - 10^3$	
$f = 10^5 - 10^6$ Гц	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{13}$	$10^2 - 10^3$	
Електричне	$10^9$	$10^4 - 10^6$	$10^3 - 10^5$	Досягає іоносфери
Магнітне	$10^{10}$	$10^8$	$10^2$	Те ж
Інфразвукове	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^2$	Досягає висот ~300 км

Перша зона по широті простягається на  $\pm 300$  км ( $\pm 3^\circ$ ) від епіцентру. Тут відзначається підсилення атмосферної емісії на довжинах хвиль 557.7 і 630 нм і варіації рівня випромінювання на частотах  $\sim 10 - 10^2$  Гц.

Розмір другої зони за широтою досягає  $\pm 600 - 700$  км ( $\pm 6^\circ$ ) відносно епіцентру. У цій зоні фіксуються електромагнітні випромінювання в діапазоні 1–10 Гц, плазмові неоднорідності, геомагнітні пульсації та квазістатичні електричні поля.

Третя зона по широті віддалена на  $\pm 3000$  км ( $\pm 30^\circ$ ) від границі епіцентра. Тут спостерігаються варіації висотного профілю  $N$ , зміни іонного складу, висипання енергійних електронів з радіаційного поясу і сплески ДНЧ-випромінювання.

По довготі розмір збуреної ЗТ зони в 2–3 рази більший, ніж за широтою.

В цілому зі зростанням висоти розмір цієї зони збільшується і приймає форму сплющеної за широтою „вирви” (див. також [56, 57]).

Збурення від ЗТ поширюються також в горизонтальному напрямку. Найбільш зрозумілим механізмом перенесення збурень є АГХ і сейсмічні хвилі. Швидкість останніх змінюється від 3–4 до 6–8 км/с [64]. Менш вивчена роль повільних магнітогідродинамічних (МГД) і гіротропних хвиль [65].

Завдяки слабкозатухаючим хвильовим процесам збурення від ЗТ можуть стати не тільки великомасштабними (характерний розмір  $L_c \sim 1000$  км), але і глобальними, коли  $L_c \sim 10000$  км.

Результати радіофізичних досліджень ефектів, що супроводжували ЗТ, описані в цілому ряді робіт (див., наприклад, [66–79]). Підтверджено, що ЗТ викликали збурення у всіх областях іоносфери і носили великомасштабний і навіть глобальний характер. Спостерігалися як аперіодичні, так і квазіперіодичні процеси.

У D-області іоносфери величина квазіперіода  $T$  становила 2–3, 5–6 хв, в E і F-областях  $\sim 5$ –10 і 10–60 хв відповідно. Тривалість реакції у середньому порядку 10, 10–20 та 20–60 хв відповідно [66].

Найбільше число робіт по сейсмо-іоносферних ефектах виконано для F-області іоносфери [56, 59].

На відстанях  $R \leq 2000$ –3000 км від епіцентру удавані швидкості  $v$  хвильових процесів становили 0.3–0.7 км/с (для нижньої та середньої іоносфери), 1–2 і 3–4 для E і F-областей. Рідше реєструвалися процеси з  $v \approx 5$ –6 і 8–10 км/с. Невпевнено спостерігалися ефекти, яким відповідало значення  $v \sim 10$ –100 км/с.

Наряду з регулярними варіаціями характеристик радіосигналів мали місце їх флуктуації. Це означає, що ЗТ викликають як регулярні, так і випадкові зміни параметрів іоносферної плазми, а значить, і радіоканалів.

### 1.3.2 Іоносферні ефекти землетрусів

Іоносферні ефекти ЗТ і їх передвісників вивчаються як експериментально (див., наприклад, [47, 48, 59, 70, 80, 81]), так і теоретично (див., наприклад, [60, 61, 71, 82–86]).

Генеровані під дією ЗТ і їх передвісників (або його передвісники) АГХ модулюють концентрацію електронів  $N$  в іоносфері. Остання є малою домішкою у верхній атмосфері. В результаті виникають рухомі іоносферні збурення (РІЗ), період яких збігається з періодом АГХ.

Відносна амплітуда  $N$  в РІЗ дається наступним співвідношенням [21]:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = A_N \frac{\Delta p}{p_0}, \quad (1.4)$$

де

$$A_N = \frac{\sqrt{(2\Omega^2 - \gamma)^2 + (2\gamma k_z H)^2}}{2\gamma |1 - \Omega^2|}, \quad (1.5)$$

$\Omega = \omega/\omega_b$ ,  $\omega$  і  $\omega_b$  – частоти АГХ і Брента–Вяйсяля,  $\gamma$  – показник адіабати,  $k_z$  – проєкція хвильового вектора на вертикальну вісь,  $H$  – приведена висота нейтральної атмосфери,  $\Delta p/p_0$  – відносна амплітуда тиску в АГХ, що дається виразом:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\Delta p(0)}{p_0(0)} e^{z/2H}, \quad \frac{\Delta p(0)}{p_0(0)} = \frac{v(0)}{c_s}, \quad (1.6)$$

Часто  $(2\gamma k_z H)^2 \gg 1$ , а  $\Omega^2 \ll 1$ . Тоді  $A_N \approx k_z H$  може бути суттєво більше одиниці, а значить  $\Delta N/N_0 \gg \Delta p/p_0$ . При  $(2\Omega^2 - \gamma)^2 \gg (2\gamma k_z H)^2$  і  $\Omega^2 \gg 1$  маємо  $A_N \approx \gamma^{-1} \approx 0.71$ . Якщо  $\Omega \rightarrow 1$ , то  $A_N \approx k_z H/(1 - \Omega^2) \gg 1$ .

Виявляється, що  $A_N \approx 1.2-0.7$  при  $\Omega \approx 10^{-4}-10^2 \text{ с}^{-1}$  [21].

Важливо також, що

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right)_{z_0} e^{(z-z_0)/2H}, \quad (1.7)$$

тобто зростає зі збільшенням висоти (табл. 1.9).

Таблиця 1.9

**Залежність від висоти відносної амплітуди РІЗ ( $\Delta p/p_0 = 0.01$  при  $z = 100 \text{ км}, A_N = 3$ ) [21]**

$z, \text{ км}$	100	120	150	200	250	300
$\Delta N/N_0$	0.03	0.1	0.3	1	1.7	3

З табл. 1.9 видно, що амплітуда РІЗ в Е- і F-областях іоносфери може бути значною. Такі хвилі впевнено виявляються радіофізичними методами спостережень.

### 1.3.3 Результати спостережень

Для експериментального дослідження сейсмо-іоносферних ефектів використовувався цілий арсенал наземних і наземно-космічних методів: вертикального зондування [80], магнітометричний [80], похилого зондування [66, 79, 87], часткових відбиттів [66, 79, 87, 88], ДНЧ-зондування [89], GPS-методи [69, 90] та інші.

Результати досліджень іоносферних ефектів ЗТ представлені в роботах [67–69, 72–75, 81, 90–95]. Для цих цілей використовувалася мережа станцій GPS. Детально вивчено просторово-часову структуру збурень в іоносфері, що викликаються ЗТ. Встановлено, що хвильові збурення поширюються зі швидкістю ударних АГХ (близько 1 км/с) і хвиль Релея (близько 3 км/с). На відстанях порядку 3 тис. км відносні збурення повного електронного вмісту не перевищують 1% [75].

Дослідження сейсмо-іоносферних збурень триває і в даний час [67, 73–75, 92–94, 96–100]. Підтверджено, що хвильові збурення в іоносфері генеруються під дією сейсмічних, інфразвукових і атмосферних гравітаційних хвиль, відстежено рух хвильового фронту від епіцентру землетрусу, оцінено збурення повного електронного вмісту, концентрації електронів  $N$ , швидкості руху хвиль, їх період. Спостереження виконані для різних землетрусів при різних умовах. Однак залишається невстановленим, як величина і характер сейсмо-іоносферних ефектів залежать від стану атмосферної та космічної погоди, а також магнітуди і глибини епіцентру землетрусу. До теперішнього часу вивчалися сейсмо-іоносферні ефекти для унікальних землетрусів з магнітудою  $M \approx 8 - 9$ . Представляє інтерес пошук іоносферних ефектів, викликаних помірними землетрусами ( $M \approx 6$ ). Енергія таких сейсмічних подій в тисячі–десятки тисяч разів менше енергії унікальних



землетрусів. Належить з'ясувати, на які відстані поширюються сейсмо-іоносферні збурення при помірних землетрусах, якими є їхні параметри і особливості.

#### **1.4 Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних тайфунами**

Спостереження за фізичними процесами в підсистемах систем ЗАІМ та СМСМІАЗ буде успішним, якщо відома енергетика джерела впливу, місце і час його спрацьовування. Одним з таких джерел є урагани (тайфуни) [19, 21].

Тайфуном називається сильний ураган, що виникає в північно-західній частині Тихого океану. Для унікальних тайфунів швидкість вітру досягає 60 – 70 м/с, дефіцит тиску – 130 – 150 гПа, радіус – 750 км і більше. Енергія такого тайфуну наближається до  $10^{19}$  Дж, а потужність – до  $10^{14}$  Вт [19, 21].

Тайфун генерується внаслідок скидання в атмосферу надлишку тепла в океані. На генерацію унікального тайфуну витрачається  $10^{20}$  –  $10^{21}$  Дж енергії [19, 21].

Вплив тропосферних процесів на іоносферу вперше обговорювався в роботах [102, 103].

Вперше вплив потужних метеопроцесів на верхню атмосферу виявили автори [104]. Реакцію іоносфери на сильну атмосферну бурю описали автори [105]. Доплерівським методом вони виявили хвильові процеси з періодом 1 – 5 хв, котрі могли генеруватися бурею в тропосфері.

Згодом вплив потужних метеопроцесів, ураганів і тайфунів вивчався багатьма авторами (див., наприклад, [19, 106–124]). У цих роботах шляхом спостережень встановлена важлива роль акустико-гравітаційних хвиль у взаємодії атмосфери і іоносфери. Теоретичні дослідження впливу ураганів і тайфунів проведені авторами [19, 125–129].

Незважаючи на те, що реакції іоносфери на урагани (тайфуни) вивчалися десятки років, їх вивчення залишається актуальною проблемою. Для цього є кілька причин. По-перше, реакція іоносфери суттєво залежить від особливостей та параметрів конкретного тайфуну. По-друге, реакція залежить від сонячної

активності, сезону, місцевого часу, стану тропосферної та космічної погоди. Таким чином, дія двох подібних тайфунів не дає однакової реакції іоносфери. По-третє, доцільно, щоб нові методи брали участь у виявленні іоносферних ефектів від тайфунів, які забезпечують додаткову інформацію, на додаток до традиційних методів, іонозондів та GPS-мереж.

Іоносферні збурення, викликані тайфунами, були вивчені за допомогою доплерівського радіозондування у ВЧ-діапазоні [107]. Ці результати знайшли підтвердження в роботі [111]. Автори цієї роботи виконали аналіз реакцій іоносфери на 24 тайфуну і встановили основні закономірності в реакції. Автори [110] вивчали відгук іоносфери на тайфуни в ракетних експериментах. Ці автори виявили зниження концентрації електронів  $N$  у Е-області іоносфери. Реакцію шару  $F_2$  вони не виявили.

Найбільший обсяг інформації про іоносферні збурення, що викликаються тайфунами, був отриманий за допомогою GPS-технологій (див., наприклад, [112]). За часовими варіаціями повного електронного вмісту (ПЕВ) були вивчені квазіперіодичні варіації  $N$  з періодами  $T < 20$  хв і  $T \approx 20 - 60$  хв [116, 129]. Було встановлено, що середня амплітуда квазіперіодичних збурень при  $T \approx 20 - 60$  хв у 1.5 – 2 рази більше, ніж при  $T < 20$  хв [116].

З використанням кореляційної методики автори [129] показали, що квазіперіодичні збурення посилюються при набіганні повітряних мас на берегову лінію. Збудження цих збурень найбільш ефективно відбувається при найбільшій потужності тайфуну, при максимальній швидкості руху повітряних мас. Це означає, що генерація квазіперіодичних збурень не пов'язана з оком тайфуну, де рухи повітря відсутні.

Автори [116] встановили, що амплітуда іоносферних збурень пропорційна потужності тайфуну. Автори [120] проаналізували варіації ПЕВ в період існування шести тайфунів в Східній Азії та чотирьох ураганів в Північній Америці і встановили морфологічні риси іоносферних збурень. За допомогою GPS-технологій знайдено, що максимальні зменшення  $N$  (до 50 %) виникали на межі тайфуну, а не поблизу його ока [121].

Не завжди GPS-технології приводять до виявлення іоносферного відгуку на тайфуни [112].

Крім збурень  $N$ , тайфуни здатні викликати локалізовані збурення квазістаціонарного електричного поля. За даними [125–127] їх амплітуда була  $\sim 25$  мВ/м. Автори [124] за допомогою супутників SWARM вивчили вплив тайфуну Vongfong 2014 на іоносферу і геомагнітне поле. Показано, що значення  $\Delta N/N$  можуть досягати 10 %, а варіації геомагнітного поля становили 0.5–1.5 нТл при періоді  $T \approx 10$  с.

В роботі [130] представлений огляд ефектів атмосферно-іоносферної взаємодії, викликаних різними фізичними причинами.

В даний час механізми взаємодії підсистем в системі ЗАІМ при генерації та русі тайфунів достовірно не встановлені. Вважається, що основним механізмом є генерація турбулентністю, утвореною тайфуном, акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) [107, 113, 119].

Високочастотна частина ( $T \approx 1 - 5$  хв) цих хвиль відноситься до інфразвуку, а низькочастотна ( $T \approx 10 - 60$  хв) до внутрішніх гравітаційних хвиль [131, 132]. З інфразвуком може бути пов'язана генерація МГД хвиль (геомагнітних пульсацій). Тайфун також може призводити до виникнення стороннього електричного струму, генерації квазістаціонарного електричного поля [19, 21, 125]. Додаткове електричне поле також може бути обумовлено рухом нейтралів в нижній іоносфері з подальшим захопленням заряджених частинок [19, 21]. Це поле здатне впливати на високоенергійні електрони внутрішнього радіаційного поясу і при певних умовах призводити до їх висипання.

В даний час не вивчена залежність реакції іоносфери на тайфуни від часу доби, сезону, стану атмосферної та космічної погоди, положення в циклі сонячної активності. Недостатньо вивчений відгук різних областей іоносфери на тайфуни. Не виявлена реакція магнітосфери і радіаційного поясу на тайфуни. Потрібне уточнення кількісних характеристик вже виявлених іоносферних ефектів тайфунів. Доцільне залучення інших методів дослідження реакції іоносфери на

тайфуни. Все це обумовлює актуальність досліджень відгуку системи ЗАІМ і, зокрема, іоносфери на дію тайфунів.

### **1.5 Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних геокосмічними бурями**

В даний час проблема геокосмічних бур – найважливіша проблема космічної геофізики, вона є частиною проблеми сонячно-земних зв'язків. Загальним питанням, що відносяться до цієї проблеми, присвячено тисячі наукових робіт (див., наприклад, [14, 17, 132–147]).

Сонячно-земні зв'язки проявляються у різноманітті геоелектричних потоків широкодіапазонного електромагнітного випромінювання, високоенергійних протонів і релятивістських електронів, а також сонячного вітру (сонячної плазми). Як відомо, електромагнітне випромінювання досягає Землі через 8 хв, потоки високоенергійних частинок – через час від 20–30 хв до 20–30 год, потоки плазми – через 2–4 доби. Зростання інтенсивності електромагнітного випромінювання Сонця в рентгенівському та ультрафіолетовому діапазонах призводить до збільшення концентрації електронів  $N$  в іоносфері і, як наслідок, до раптових іоносферних збурень (SID), супроводжуваних збільшенням поглинання космічного радіовипромінювання, сигналів СЧ і ВЧ діапазонів, фазовим аномаліям сигналів НЧ і ДНЧ діапазонів і т. п. Збільшення потоків високоенергійних частинок призводить до додаткової іонізації атмосфери на висотах менше 100 км, створює підвищену радіаційну небезпеку для космічних апаратів, космонавтів, висотних літаків.

Викиди корональної маси і ударні хвилі сонячного походження, досягають Землі через 2–4 доби після сонячного спалаху (сонячної бурі).

Збурення на Сонці в результаті складної взаємодії сонячного вітру з магнітним полем Землі призводять до геокосмічних бур. Інтенсивні бурі викликають не тільки порушення комунікацій, але й збої в роботі ліній

електропередач, систем радіонавігації та радіолокації, зміни траєкторій космічних кораблів, впливають на погоду, здоров'я людей і стан всієї біосфери Землі.

Геокосмічна буря (ГБ) супроводжується сильними збуреннями геомагнітного поля, іоносфери, верхньої атмосфери, геоелектричного поля магнітосферно-іоносферного походження і навіть тропосфери, а також земних струмів. Виникає взаємодія двох погодних систем – космічної та атмосферної. Тому має сенс розглядати атмосферно-космічну погоду в цілому [9].

Освоєння геокосмосу, його використання для потреб людства призвело до того, що повсякденне життя людини все більше залежить від проявів сонячно-земних процесів, стану атмосферно-космічної погоди та наземно-космічних технологічних систем. Все це обумовлює актуальність, велику наукову і практичну значимість дослідження проявів сонячно-земних процесів, варіацій атмосферно-космічної погоди та ефектів геокосмічних бур у всіх геосферах, включаючи біосферу [9].

Важливо підкреслити, що кожна ГБ є унікальною подією, яка характеризується великою різноманітністю фізичних ефектів, їх власною індивідуальною динамікою.

Відомо багато прикладів, які свідчать про «уразливість» сучасної цивілізації до процесів, супутнім геокосмічним бурям [9].

Магнітні, іоносферні, атмосферні і електричні бурі, представляючи собою прояв єдиного процесу – геокосмічної бурі, часто охоплюють майже всю планету одночасно [9]. Для всебічного дослідження ГБ необхідні добре сплановані експерименти у планетарному масштабі, обмін даними, їх спільний аналіз.

До числа міжнародних програм відноситься програма STEP (Solar-Terrestrial Energy Program), яка з 1990 р. об'єднує зусилля вчених різних країн в дослідженні процесів переносу енергії в системі Сонце – Земля. Проект CEDAR (Coupling, Energetics, and Dynamics of Atmospheric Regions) за підтримки Національного наукового фонду США координує роботи з вивчення взаємодії високоенергетичних і динамічних процесів у верхній атмосфері Землі.

Відповідно до програми CEDAR Storm Study [148] протягом 1990–1997 рр. проведена серія координованих спостережень іоносферно-термосферних збурень на світовій мережі радарів некогерентного розсіяння.

Ці роботи були розширені додатковими дослідженнями в рамках ще однієї великої програми NSWP (National Space Weather Program), спрямованої на вивчення і прогнозування космічної погоди з метою запобігання збоїв в роботі комерційних і військових систем зв'язку [149].

Аналогічні роботи, спрямовані на моделювання і синтез процесів в системі CMCMIA3, проводить міжнародна програма сонячно-земної фізики ISTP (International Solar-Terrestrial Physics Program) [150]. Огляд найважливіших результатів вивчення варіацій космічної погоди наведено в [151].

В Європі дослідження іоносферних збурень здійснює програма PRIME (COST 238) [152]. Згідно з нею проведено ряд координованих циклів вимірювань на мережі іонозондів.

Інтенсивні дослідження протягом останнього десятиліття, у тому числі в рамках перерахованих програм, значно просунули наші знання про взаємозв'язок сонячно-земних процесів, прояви геокоосмічних бур і варіації космічної погоди. Проте, залишається багато проблем у розумінні фізичних процесів, супутніх геокоосмічним бурям. Справа в тому, що кожна буря поряд із загальними закономірностями має індивідуальні особливості. Ще складніше йдуть справи з моделюванням і прогнозом цих процесів в глобальних масштабах у всіх областях навколоземного простору. Спостереження кожної ГБ дає цінний внесок у розв'язання проблем, що стоять.

Іоносферні бурі вивчаються понад 50 років (див., наприклад, [152, 153]). Їм присвячений ряд оглядів [154–157]. Статистика бур представлена в роботах [158–161]. Особливості просторово-часового розподілу ефектів іоносферних бур описані в [162, 163]. Моделювання ефектів іоносферних бур проводилося авторами [164–169].

Статистика найбільш сильних МБ представлена в роботі [170]. Статистичні властивості магнітних бур за 1985–2005 і 1932–2009 рр. обговорюються в роботі [171].

## **1.6 Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних Челябінським метеороїдом**

### **1.6.1 Загальні відомості про Челябінський метеороїд**

Останнім часом проблемі астероїдно-кометної небезпеки приділяється значна увага (див., наприклад, [21, 172–175]). Все більше число жителів планети усвідомлює, що ми живемо фактично у космосі, на малій і вразливій планеті.

Зважаючи на унікальність події та значущість наслідків актуальною проблемою є детальне та всебічне вивчення ефектів падіння на Землю кожного досить великого космічного тіла, а також наслідків такого падіння. Яскравим прикладом подібної події є проліт і вибух Челябінського метеороїда.

Вперше в історії науки вибух великого космічного тіла над населеними пунктами добре задокументований за допомогою цілого ряду технічних засобів. Частково постраждали споруди, переважно вікна, двері, стіни та стелі.

Метеороїд вторгнувся в атмосферу Землі 15 лютого 2013 р. в 03:20:26 UT. Космічне тіло рухалося з південного сходу на північний захід (азимут становив близько  $283^\circ$ ) під кутом до горизонту близько  $18^\circ$ . Початкова маса тіла  $m_0 \approx 11$  кт, початкова швидкість  $v_0 \approx 18.5$  км/с, а початковий діаметр тіла  $d_0 \approx 18$  м [176–179]. Знайдені уламки метеориту свідчать про те, що він був кам'яним, точніше, космічне тіло являло собою хондрит типу LL5.

Взаємодії метеороїдів з атмосферою присвячено ряд робіт (див., наприклад, [180–188]). В роботі [184] вперше вивчені особливості руху та руйнування космічних тіл в атмосфері, розроблено теорію їх прогресивного дроблення. Рух великих тіл в атмосфері розглядався в роботі [180]. Дроблення малих астероїдів і супутні ефекти досліджувалися в статті [185]. Розвиток теорії та фізичного механізму квазінеперервного дроблення болідів представлено в роботах [182, 183].

Книга [186] присвячена застосуванню досягнень фізико-хімічної динаміки до аналізу метеороїдів. У книгах [187, 188] представлено сучасний аналіз метеорних явищ і кометно-астероїдної небезпеки.

Ефектам Челябінського метеороїда присвячені роботи цілого ряду дослідників (див., наприклад, [179, 189–222]).

Мета цього підрозділу – опис основних фізичних ефектів, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда.

### **1.6.2 Іоносферні ефекти Челябінського метеороїда**

Вплив на іоносферу може здійснюватися по декількох каналах [199]. По-перше, при прольоті космічного тіла через іоносферу. По-друге, за допомогою ударної хвилі. По-третє, вплив на іоносферу може здійснювати електромагнітне випромінювання, що генерується слідом.

Результати перших спостережень іоносферних ефектів прольоту Челябінського метеороїда опубліковані авторами [224–226]. В перших двох роботах повідомляється, що метеороїд викликав збурення в іоносфері, а в останній роботі їх наявність не виявлено. Потрібне залучення як інших методів діагностики, так і інших методів обробки даних спостережень. Певною мірою це зробили автори робіт [192, 195, 197, 198, 201, 204, 205, 207, 215, 225, 227–230]. В цих роботах обговорюються іоносферні ефекти, що послідували за прольотом і вибухом Челябінського метеороїда. Вимірювання виконані різними радіофізичними методами і на різних висотах. З робіт [192, 195, 197, 198, 201, 204, 205, 207, 215, 225, 227–230] випливає, що метеороїд викликав помітні ефекти в іоносфері.

### **1.6.3 Особливості Челябінського метеороїда**

Проліт і вибух Челябінського метеороїда викликав цілий комплекс як короткоіснуючих ( $\sim 1$  с), так і довгоіснуючих (години, тижні і навіть багато



місяців) фізичних (і не тільки фізичних) процесів в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (внутрішні оболонки). За розрахунками і спостереженнями, висота основного енерговиділення приблизно дорівнювала 23 км [189, 190].

Ефекти Челябінського метеороїда суттєво відрізнялися від ефектів, викликаних вибухом Тунгуського тіла. Основних причин дві. Перша з них – початкова енергія Тунгуського тіла була на два порядки більше, ніж Челябінського. Друга причина полягає в тому, що висота вибуху Тунгуського тіла  $z_e \approx 6\text{--}8$  км. Тому зона значних (майже повних) руйнувань і пожеж при падінні Тунгуського тіла становила близько 2000 і 500 км<sup>2</sup> відповідно (див., наприклад, [173]). Зона часткових руйнувань в Челябінській області не перевищувала 6000 км<sup>2</sup>. Суттєво також відрізнялися кути нахилу траєкторії.

Досить велика висота вибуху (близько 23 км) Челябінського метеороїда призвела лише до незначних руйнувань елементів житлових будівель (вікон, віконних рам, дверей, дахів і т.п.). Цим же пояснюється і відносна легкість поранень жителів постраждалого регіону.

Магнітний ефект Тунгуського тіла склав близько 50 – 70 нТл [173], що, швидше за все, пояснюється тривалим (близько 3–4 годин) рухом плюму. У той же час для Челябінського тіла магнітний ефект був близький до 1 нТл, причому варіації геомагнітного поля могли бути викликані модуляцією іоносферних струмів ВГХ, породженими прольотом і вибухом Челябінського метеороїда.

В процесі вивчення фізичних ефектів, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда, виявлено кілька нових явищ [219, 223].

Вперше приблизно на широті Челябінська спостерігався довгоіснуючий (кілька місяців) пояс пилу [223].

Вперше спостерігалися кам'яні нитки базальта або піроксена, що утворилися при високотемпературному руйнуванні Челябінського космічного тіла [223].

Вперше встановлено, що за 50–30 хв до вибуху метеороїда, тобто при його русі в магнітосфері, а потім в термосфері й іоносфері, швидше за все, виникли первинні ефекти [219]. Проліт і вибух Челябінського тіла в стратосфері викликав

вторинні ефекти в літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, тобто у всій системі ЗАІМ.

Важливо, що збурення, викликані вибухом Челябінського тіла, поширювалися як по вертикалі на сотні кілометрів вгору, так і по горизонталі на відстані в тисячі кілометрів. Реєстровані збурення виникли не тільки в атмосфері, але й в іоносфері, а також геомагнітному полі. Вивчення всього комплексу явищ вимагає системного підходу до об'єкту Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, тобто до системи ЗАІМ в цілому [2–5, 10, 20, 21, 29, 41, 219, 223, 231–233].

В роботах [199, 200] зроблена спроба самоузгодженого вивчення і моделювання великої кількості фізичних ефектів, викликаних прольотом і вибухом Челябінського метеороїда.

## **1.7 Огляд результатів дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних стартами ракет**

### **1.7.1 Загальні відомості**

Експериментальному і теоретичному дослідженню ефектів, викликаних стартами ракет (СР), присвячена велика кількість робіт. Результати досліджень підсумовані в спеціальних довідникових посібниках [234, 235]. Як правило, в наявних роботах описані ефекти, які спостерігаються вздовж активної ділянки траєкторії ракети (див., наприклад, [236, 237]).

Значно менше робіт присвячено дослідженню збурень на відстанях  $\sim 1$ –10 тис. км від траєкторії ракети. Практично всі вони виконані авторами з Харківського національного університету (ХНУ) імені В. Н. Каразіна та Інституту іоносфери НАНУ і МОНУ [238–252]. Відповідні збурення автором [29, 41] названі великомасштабними і глобальними. При цьому розуміється, що збурення поширюються аж до глобальних відстаней. Встановлено, що тривалість цих збурень досягає 80 – 90 хв, що при їх швидкості порядку 1 – 3 км/с відповідає протяжності 5 – 20 тис. км. Так що й по протяжності ці збурення є глобальними [1–5].

До теперішнього часу не побудовані детальні фізико-математичні моделі супутніх стартам ракет процесів. Часто не можна впевнено стверджувати, що дане збурення викликано СР, не вивчені до кінця механізми генерації та переносу збурень на значні і глобальні відстані. Причина полягає в тому, що виникаючі техногенні збурення принципово нічим не відрізняються від природних.

Як відзначає автор [29, 41], дослідникам не залишається нічого іншого, як збільшувати обсяг спостережень і вести пошук повторюваних закономірностей. У цьому полягає перший аспект подібних досліджень.

Другий аспект полягає у наступному. Останнім часом значна увага приділяється системному підходу до дослідження фізичних процесів в системі ЗАІМ. Видне місце в подібних дослідженнях займає вивчення реакції атмосфери і геокосмосу на вплив джерел з великим енерговиділенням. Воно дозволяє простежити за процесом переносу збурень на відстані  $\sim 1-10$  тис. км, визначити типи хвиль, які відповідають за це, а також виявити особливості взаємодії підсистем в системі ЗАІМ. В якості техногенного джерела енерговиділення зручно використовувати старти і польоти потужних ракет, що відбуваються в різних точках земної кулі і віддалені від місця спостереження на  $1 - 10$  тис. км. Різні віддалення космодромів, різна енергетика ракет, різний склад палива і різноманітні траєкторії космічних апаратів (КА) забезпечують варіювання «початкових умов» і гнучкість в дослідженні реакції системи ЗАІМ на вплив такого джерела. Як відзначає автор [41], оскільки самі процеси, супутні СР, і їх параметри вивчені недостатньо, спочатку доцільно організувати систематичні дослідження можливої реакції середовища на старт однотипних ракет спочатку з одного і того ж космодрому, а потім з різних космодромів.

Третій аспект зводиться до наступного. На рубежі XX і XXI століть потужність ракет і частота їх запусків досягли таких значень, що доводиться рахуватися зі збуреннями в атмосфері та геокосмосі. Дослідження цих збурень представляє інтерес для фахівців в області геофізики, радіофізики, екології атмосфери і геокосмосу, а також космічної погоди.

Ракетно-космічна техніка (РКТ) справляє комплексний вплив на підсистеми в системі ЗАІМ. До них відносяться сейсмічний, динамічний, тепловий, акустичний, магнітогідродинамічний і електромагнітний впливи. Тому канали впливу РКТ на систему ЗАІМ, а значить і на атмосферно-космічні радіоканали, надзвичайно різноманітні. Вони являють собою цілий ряд пов'язаних між собою груп. Кожна група асоціюється з певними фізичними процесами і збуреннями в системі ЗАІМ.

Хвильові процеси, які супроводжували старти і маневри РКТ, призводять до взаємодії підсистем у системі ЗАІМ. Зокрема, АГХ призводять до виникнення РІЗ. У свою чергу, РІЗ викликають квазіперіодичну модуляцію іоносферних струмів і генерацію геомагнітних пульсацій з відповідними періодами.

Крім ударних хвиль і АГХ, польоти РКТ служать джерелом і інших хвиль, швидкості яких складають одиниці, а можливо, і десятки кілометрів в секунду. Ними можуть бути як повільні МГД, так і гіротропні хвилі. І ті, і інші спостерігалися не так впевнено, як ударні хвилі і АГХ.

Крім наукової значущості, ефекти, що супроводжували функціонування РКТ, мають і прикладну значимість. По-перше, збурення в навколоземному середовищі суттєво впливають на поширення радіохвиль ВНЧ–НВЧ діапазонів, а значить і на роботу систем телекомунікацій, радіолокації, дистанційного радіозондування, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу середовищ. По-друге, експлуатація РКТ призводить до небажаних екологічних наслідків. Сюди відносяться викиди продуктів згоряння (плазми, хімічно активних речовин, аерозолів, тепла і т. д.). Плазма факела ракети суттєво змінює провідність, відбивні та розсіюючі властивості середовища й атмосферно-космічних радіоканалів.

Хімічно активні речовини призводять до хімічних реакцій, невласивим незбуреному навколоземному середовищу, утворенню довгоіснуючих іоносферних «дір», які суттєво впливають на іоносферні радіоканали, частковому руйнуванню озонового шару, випаданню кислотних дощів і т. п.

Викиди аерозолів суттєво змінюють оптичні властивості прилеглого до сліду ракети середовища. Падіння перших ступенів ракет, зростання маси і числа фрагментів космічного сміття являють собою серйозну екологічну небезпеку.

Як відзначає автор [29, 41], із зазначених причин дослідження викликаних польотами РКТ збурень в атмосфері й геокосмосі, засмічення геокосмосу сміттям і чужорідною речовиною будуть ще довго залишатися актуальними.

### **1.7.2 Відомості про космодроми та ракети**

Космодроми є в 12 країнах світу (див. табл. 1.10, 1.11). Найбільш активно використовуються 16 космодромів, у тому числі чотири – Росією і стільки ж США. Площа найбільшого в світі космодрому, побудованого на мисі Канаверал (США), становить близько 400 квадратних кілометрів, а число стартових комплексів – 48 (на Байконурі – 15) [3].

Висота найбільшої ракети «Apollo» перевищувала 100 метрів, а маса була близька до 3 тисяч тонн. Найбільша ракета 1980-х рр. мала масу близько 2.5 тисяч тон і висоту близько 50 метрів. Така ракета в секунду спалювала близько 10 тонн палива і викидала в атмосферу далеко не нешкідливі продукти згоряння. Самі “маленькі” космічні ракети мають масу близько 100 тонн. Важливо, що маса палива в ракетах всіх типів становить майже 90% маси ракети.

Найменш шкідливим паливом вважається рідкий водень. В результаті його згоряння утворюється водяна пара. Таке паливо використовується у ракетах-носіях “Space Shuttle” (США). Крім того, у цих же ракетах знаходять застосування і твердопаливні прискорювачі, які призводять до дуже шкідливих викидів. Українська ракета “Зенит-2”, як і російська “Союз” (“Русь”), використовує гас – порівняно нешкідливе паливо. У російській ракеті “Протон” застосовується дуже агресивне і високотоксичне паливо – гідразин (гептил).

Збурення в системі ЗАІМ, а також екологічні наслідки залежать від маси ракет, що стартують, частоти запусків. Вантажопотік становить близько 2200, 700

## Основні відомості про ракети

Ракета (країна)	Космодром	Повна маса, кг	Початкова тяга, МН	Ступені: нульова (перша) друга (третя) четверта	
				Час роботи, с	Тяга (вакуум), МН
«Енергія» (СРСР)	Байконур	2524600	35.11	145 (480) 160 (–)	4×7.9 (7.84) 1.96 (–)
«Space Shuttle» (США)	Мис Канаверал	2029633	25.73	124 (480) 480 (–)	2×11.51 <sup>1</sup> (0) <sup>2</sup> 6.83 – «Шаттл» (–)
«Протон» (Росія)	Байконур	711110	8.84	– (124) 206 (238) 600	– (10.46) 2.40 (0.63) 0.85
«Ariane 5» (Франція)	Куру	710000		123 (650) 1100 (–)	6.47 (1.34) 0.065 (–)
«Зеніт» (Україна)	Запускається з моря	478390	7.55	– (150) 315 (–)	– (8.18) 0.91 (–)
«Ariane 4» (Франція)	Куру	470000	5.39	142 (205) 125 (59)	4×0.75 (3.03) 0.80 (0.63)
«Союз» (Росія)	Байконур, Плесецьк	297400	4.02	118 (286) 250 (–)	4×0.99 (0.98) 0.30 (–)
«Atlas» (США)	Мис Канаверал, Вандерберг	234000	3.54	56 (172) 283 (392)	4×0.48 (2.09) 0.39 (0.18)
«Delta» (США)	Мис Канаверал, Вандерберг	230000	3.52	64 (265) 444 (88)	4×0.49 (1.05) 0.42 (0.67)
«Titan» (США)	Мис Канаверал, Вандерберг	150530	1.90	– (139) 180 (–)	– (217) 0.44 (–)
«Космос» (Україна)	Плесецьк, Капустин Яр	107500	1.48	– (130) 375 (–)	– (1.74) 0.16 (–)
«Рокот» (Росія)	Плесецьк, Капустин Яр	97170	1.55	– (121) 155 (–)	– (1.78) 0.21 (–)
«Pegasus» (США)	Запускається з повітря	24000	0.49	4590 (73) 73 (65)	0.56 (0.59) 0.15 (0.35)
2F (Китай)		480	5.923		
3B (Китай)		425.5	5.924		
4B (Китай)		254	2.971		
3A (Китай)		241	2.962		
2D (Китай)		232	2.962		
2C (Китай)		192	2.786		

та 600 тонн в рік для космодромів Байконур, мис Канаверал і Плесецьк відповідно.

<sup>1</sup> твердопаливні прискорювачі

<sup>2</sup> бак КА

**Основні відомості про космодроми**

Місце старту (Власник)	Географічні координати (широта, довгота)	L-оболонка	Відстань від місця спостереження, км
Капустин Яр (Росія)	48.51°N, 45.80°E	1.86	700
Плесецьк (Росія)	62.70°N, 40.35°E	3.42	1470
Байконур (Росія)	45.63°N, 63.26°E	1.60	2050
Джіукван (Китай)	41.10°N, 100.30°E	1.35	4930
Шріхарікота (Індія)	13.80°N, 80.30°E	1.00	5630
Чанченъцзе (Китай)	28.10°N, 102.30°E	1.10	5980
Кагосіма (Японія)	31.25°N, 131.1°E	1.15	7730
Танегасіма (Японія)	30.40°N, 131.00°E	1.14	7800
Уоллопс (США)	37.83°N, 75.48°W	2.28	8220
Мис Канаверал (США)	28.45°N, 80.53°W	1.66	9330
Куру (Франція)	5.20°N, 52.73°W	1.07	9500
Едвардз (США)	34.50°N, 117.50°W	1.79	10310
Ванденберг (США)	34.63°N, 120.5°W	1.77	10370

**1.7.3 Вплив запусків ракет на приземну атмосферу**

*Ефекти в атмосфері.* Шлях у космос лежить через приземну атмосферу (висоти до 10 – 20 кілометрів). Тут відбуваються найбільші за масою викиди продуктів згоряння. Тут генеруються найбільші за потужністю акустичні й електромагнітні (включаючи оптичні) випромінювання.

Найбільш екологічно чиста ракета США – система “Space Shuttle” – в результаті роботи двигунів в атмосферу викидає близько 1850 тонн продуктів згоряння, приблизно половина цієї маси – в приземну атмосферу. Тільки соляної кислоти інжектуються в середовище 160 тонн, з них понад 90 тонн – в приземну атмосферу.

Крім розглянутого впливу, запуски КА супроводжуються тепловим, газодинамічним, електромагнітним впливом струменя, динамічним впливом корпусу ракети та іншими ефектами, а також генерацією хвиль і полів різної фізичної природи.

Старт ракет призводить до часткового руйнування озоносфери. Озоносфера захищає планету від згубного впливу сонячної ультрафіолетової радіації (див., наприклад, [253, 254]). Знищення озону відбувається за рахунок викидів хлору і оксидів азоту. При стартах ракет щорічно в атмосферу інжектуються близько 5 тисяч тонн хлору і 100 тонн оксидів азоту. Дослідження показали, що твердопаливні ракети наносять більшої шкоди озоносфері, ніж рідинні. В даний час запуски КА здатні руйнувати озоносферу лише поблизу місця прольоту ракети, радіус збуреної зони не перевищує декількох кілометрів. Глобальний вплив запусків при нинішній їх інтенсивності малий.

#### **1.7.4 Вплив космічної діяльності на геокосмос**

Обґрунтовано, що завдяки сильній розрідженості геокосмос значно більш вразливий, ніж приземна атмосфера [29, 41].

Космічна діяльність впливає на геокосмос по декількох каналах. До них відносяться викиди великих об'ємів хімічних речовин, часто відсутніх в природних умовах, інжекція акустичної, електромагнітної та теплової енергії, засмічення навколоземного середовища фрагментами ракет і космічних апаратів (“космічним сміттям”). Розглянемо це дещо детальніше.

*Інжекція газів.* При одному старті КА “Space Shuttle” в геокосмос інжектувалося понад 120, 4, 1, 0.08 тонн води, водню, азоту та оксиду азоту



відповідно. Зауважимо, що в геокосмосі міститься всього близько 100 тонн водню. Так що в результаті 25 стартів цього КА маса водню подвоюється. Важливо також і те, що молекули води швидко розпадаються на водень і кисень, різко збільшуючи масу антропогенного водню в геокосмосі.

В результаті запуску однієї ракети “Протон” в геокосмос викидається понад 32, 37, 20, 1, 0,5 та 40 тонн вуглекислого газу, води, чадного газу, оксиду азоту, водню та азоту відповідно.

Водень техногенного походження поширюється в геокосмосі на десятки тисяч кілометрів, утворюючи характерну грибоподібну хмару. Концентрація атомарного водню в ньому на 1 – 10% перевищує фонове значення протягом декількох тижнів після запуску ракети. Молекули вуглекислого газу протягом тижня поширюються на тисячу кілометрів.

*Інжекція енергії.* Потужність акустичного і електромагнітного випромінювань великих ракет в геокосмосі досягає декількох гігават. Для порівняння зазначимо, що потужність одного блоку атомної електростанції становить 1 гігават. За сотню секунд енергія цих випромінювань становить близько 100 гігаджоулів, що еквівалентно енергії 25 тонн вибухових речовин. Ясно, що виділення такої енергії для геокосмосу не проходить безслідно.

Космічний апарат, що рухається в геокосмосі також справляє динамічний вплив на середовище, в результаті якого в ній виникають хвилі різної фізичної природи. Вони можуть поширюватися на відстані в 1 – 10 тисяч кілометрів від траєкторії ракети. Все це має суттєвий вплив на атмосферно-космічні радіоканали.

### **1.7.5 Основні ефекти стартів ракет в іоносфері**

Перерахуємо коротко основні ефекти в іоносферній плазмі, викликані стартами і польотами ракет з працюючими двигунами.

*Утворення іоносферних «дір».* Основна причина їх утворення – це дифузія продуктів згоряння і іонно-молекулярні реакції  $\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{H}_2$  з  $\text{O}^+$ . В результаті реакції

дисоціативної рекомбінації іонів  $\text{H}_2\text{O}^+$  з електронами концентрація електронів  $N$  у F-області іоносфери швидко та різко до порядку величини зменшується [236, 254–267]. По краях «діри»  $N$ , навпаки, збільшується в результаті ефекту «сніжного плуга» [255, 263, 265, 267]. Ефективна тривалість існування «дір» становить кілька десятків хвилин. Повний електронний вміст в «дірах» зменшується на  $(3–6) \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ , тобто на 50–60%.

Природно, параметри іоносферних «дір» залежать від типу двигуна РКТ, висоти, часу доби, сезону і положення в циклі сонячної активності..

*Генерація хвильових збурень у верхній атмосфері й іоносфері* [236, 267]. Розрізняють генерацію ударно-акустичних, інфразвукових, гравітаційних і гідромагнітних (МГД) хвиль. Перші мають тривалість до 3–6 хв,  $\delta_N \approx \Delta N/N \approx 10\%$ . Другі мають період  $T \sim 10–300 \text{ с}$  і тривалість  $\Delta T$  десятки хвилин. Для гравітаційних хвиль  $T \approx 5–120 \text{ хв}$  і  $\Delta T \approx 1–4 \text{ години}$  [236, 267]. Генерація МГД хвиль може бути обумовлена трьома механізмами. По-перше, перетворенням атмосферних хвиль в МГД хвилі на висотах іоносфери. По-друге, генерацією МГД хвиль реактивним струменем. По-третє, перетворенням електростатичного поля Землі в змінне електромагнітне поле під дією факела ракети. По-четверте, збільшенням провідності плазми на висотах динамо-області атмосфери, що призводить до генерації нестационарного іоносферного струму, а значить і МГД збурень.

### 1.7.6 Вплив збурень в іоносфері на поширення радіохвиль

Старти і польоти ракет суттєво впливають на поширення радіохвиль різних діапазонів (від ВНЧ до НВЧ) [236, 254–267]. При цьому виникають детерміновані та випадкові, аперіодичні та квазіперіодичні варіації всіх характеристик радіосигналу: амплітуди, фази, доплерівського зміщення частоти та поляризації. З'являється багатопроменевість і розсіяння радіохвиль.

*ВНЧ і ДНЧ радіохвилі.* За даними роботи [14] ввімкнення двигуна у магнітоспряженій точці призвело через  $\sim 2 \text{ с}$  до зниження рівня ВНЧ-шумів

приблизно на 5–10 дБ для частот 380–30 Гц відповідно. Утворення іоносферної «діри» призвело до виникнення дефокуруючої лінзи.

*НЧ і СЧ радіохвилі.* D-область іоносфери зазвичай збурюється незначно, і тому вона слабо впливає на поширення НЧ і СЧ радіохвиль. Винятком є спрацьовування тригерного механізму вивільнення енергії. В результаті висипання енергійних електронів з радіаційного поясу в атмосферу на висотах ~60–100 км  $N$  може збільшитися на порядок і більше. Це призведе до суттєвої зміни умов поширення радіохвиль від ДНЧ діапазону до УВЧ діапазону.

*ВЧ діапазон.* Цей діапазон найбільш схильний до впливу збурень в іоносфері, викликаних стартами і польотами ракет. Утворення іоносферних «дір» може призвести до відсутності відбитих сигналів, до повного порушення радіозв'язку або радіолокації у ВЧ діапазоні. Генерація неоднорідностей  $N$  призводить до «розвалу» сигналу через руйнування його когерентності.

*УВЧ, ДВЧ та НВЧ діапазони.* Найбільший вплив на радіохвилі цих діапазонів справляє штучна плазмова турбулентність, яка веде до погіршення «якості» прийнятих сигналів.

## **1.8 Експериментальна база досліджень**

### **1.8.1 Радіофізична обсерваторія**

Розпочаті понад 50 років тому дослідження геокосмоса у ХНУ імені В. Н. Каразіна інтенсивно продовжуються і у теперішній час. Для цього була створена Радіофізична обсерваторія (РФО). В ній розміщені комп'ютеризовані системи дистанційного радіозондування геокосмоса у діапазоні висот від 50 км до 1000 км, які безперервно удосконалюються та модернізуються [268].

На теперішній час наукове обладнання обсерваторії об'єднано у «Комплекс для дистанційного зондування навколоземного космічного простору», який внесений до Державного реєстру об'єктів, що становлять національне надбання України. До його складу входять активні радарні системи часткових відбиттів, вертикального доплерівського зондування, цифрового іонозонду, а також системи

пасивного спостереження доплерівських варіацій частоти та фази радіосигналів на похилих трасах, сигналів супутників глобального позиціонування та флуктуацій геомагнітного поля.

Коротко наведемо загальні характеристики засобів комплексу.

1. Система часткових відбиттів. Радіопередавальний пристрій системи виконаний за двоканальною схемою, має потужність до 50 кВт в імпульсі на один канал, робочий діапазон частот – від 1.5 до 24 МГц (при нерівномірності характеристики 3 дБ) та здатний формувати імпульси тривалістю від 25 до 100 мкс із частотою повторення до 40 Гц. Приймальна частина системи виконана на основі доробленого приймача Р-399А «Катран», швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачах Ф4226 із складу стандартних модулів комплекту апаратури «КАМАК» та блоків синхронізації та керування власної розробки. Частково відбитий сигнал окремо звичайної та незвичайної поляризацій, прийнятий з висот 60 – 100 км із розрізненням по висоті 1.5 км, зберігається на жорсткому диску комп'ютера для подальшої обробки. Антена являє собою фазовану решітку з 4 просторово рознесених схрещених пар антенних елементів типу «вертикальний ромб».

2. Система вертикального доплерівського зондування. Радар має діапазон робочих частот 1 – 24 МГц, імпульсна потужність радіопередавального пристрою – 1 кВт, тривалість зонduючого імпульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторення імпульсів – 100 Гц, смуга пропускання фільтру радіоприймального пристрою на базі дороблених приймачів типу Р-399А «Катран» – 10 Гц. Антена являє собою «вертикальний ромб» із коефіцієнтом підсилення 1 – 10 у залежності від частоти зонduючої радіохвилі. При цьому досягається відношення сигнал/завада у нічний час доби  $10^5 - 10^6$ . У денний час воно звичайно на 1 – 2 порядки менше. Прийнятий і оцифрований сигнал із доплерівськими варіаціями з діючих висот 75 – 450 км із кроком 75 км зберігається у файлах на комп'ютері для подальшої обробки.

3. Система цифрового іонозонду. Зонduючі радіоімпульси тривалістю 100 мкс із частотою слідування 125 Гц, несучою частотою, що лінійно змінюється в

діапазоні від 1 до 16 МГц, і потужністю до 1.5 кВт у імпульсі випромінюються кінцевим широкосмуговим радіочастотним підсилювачем потужності передавача “Бриг-2” через антену типу «вертикальний ромб» із коефіцієнтом підсилення 1 – 10 у залежності від частоти. Радіоприймальний пристрій на базі доробленого приймача IC-R75 під керуванням спеціального контролерного блоку змінює частоту прийому синхронно зі зміною частоти зондуючих радіоімпульсів. Контролерний блок також здійснює оцифровування прийнятого сигналу в діапазоні діючих висот 100 – 625 км і передачу даних на збереження до зовнішнього комп’ютера.

4. Система спостереження доплерівських варіацій частоти та фази радіосигналів на похилих трасах. Вимірювання доплерівських варіацій частоти іоносферних радіосигналів реалізовано на базі приймачів синтезаторного типу Р-399А (для прийому радіосигналів в діапазоні 1–32 МГц) і Р-391В2 (для прийому радіосигналів в діапазоні частот 50 кГц – 2 МГц). Дистанційне перестроювання параметрів приймачів у відповідності із заданим списком радіостанцій, оцифровування прийнятих сигналів і збереження результатів у файлах на жорсткому диску здійснюється зовнішнім комп’ютером через підключений до нього блок управління. Вимірювання фази й амплітуди сигналу з частотою 66.(6) кГц станції РБУ служби еталонних сигналів частоти і часу (Росія) здійснюється доробленим приймачем ПК-66 із мікроконтролерним блоком фазометра власної розробки. Оцифровані дані зберігаються у файлах на USB флеш-накопичувачі. Джерелом опорного сигналу для всіх критичних схем системи виступає рубідієвий стандарт частоти, який забезпечує довготривалу відносну нестабільність частотно-часових параметрів комплексу не гірше  $10^{-10}$ . Значення короткочасної відносної нестабільності майже на порядок менше.

5. Система спостереження сигналів сукупності супутників глобального позиціонування. Система складається з двох просторово рознесених (близько 50 км у північно-південному напрямі) двосистемних (GPS/ГЛОНАСС) приймачів навігаційних сигналів канадської фірми NovAtel. Приймач FlexPak6 із активною антеною типу GNSS-502 розташований в приміщенні кафедри космічної

радіофізики ХНУ імені В.Н. Каразіна ( $50.004^{\circ}\text{N}$ ,  $36.228^{\circ}\text{E}$ ). Більш сучасний приймач PwrPak7 модель DDN-LNN-TMN з активною антеною типу GNSS-802 за технологією VEXXIS розміщений на території Радіофізичної обсерваторії ( $49.632^{\circ}\text{N}$ ,  $36.323^{\circ}\text{E}$ ). Навігаційні дані безперервно, один раз у 30 с, зберігаються на жорстких дисках комп'ютерів, до яких приймачі під'єднані, для подальшої сумісної обробки.

6. Система спостереження флуктуацій геомагнітного поля. Варіації горизонтальних  $H$ - і  $D$ -компонент геомагнітного поля з розрізненням  $0.1\text{ нТл}$  –  $0.1\text{ нТл}$  у діапазоні періодів  $1\text{ с}$  –  $1000\text{ с}$  оцифровуються із періодичністю  $0.5\text{ с}$  та зберігаються у файлах на USB флеш-носії. Резервне енергоживлення забезпечує автономне функціонування магнітометра протягом до  $5\text{ діб}$  при аваріях електромережі.

Також у проведених за темою дослідженнях епізодично використовувалися дані, отримані на єдиному у середньоширотній Європі радар некогерентного розсіяння (НР), який розташований в Іоносферній обсерваторії Інститута іоносфери ( $49.6^{\circ}\text{N}$ ;  $36.3^{\circ}\text{E}$ ) [269]. Робоча частота радара дорівнює  $f_0=158\text{ МГц}$ , ефективна площа зенитної двозеркальної параболічної антени діаметром  $100\text{ м}$  – понад  $3700\text{ м}^2$ , імпульсна потужність радіопередавального пристрою дорівнює  $2\text{ МВт}$ . Для зондування іоносфери використовується сигнал, складений з двох радіоімпульсів із елементами тривалістю  $660\text{ мкс}$  і  $135\text{ мкс}$  та частотним наповненням  $f_0$  і  $f_0+0.1\text{ МГц}$  відповідно. При цьому забезпечується розрізнення по висоті приблизно  $100\text{ км}$  і  $20\text{ км}$  у діапазонах висот  $200\text{ км}$  –  $1000\text{ км}$  та  $100\text{ км}$  –  $550\text{ км}$  відповідно. Прийнятий відбитий сигнал від довгого елемента зондуючого сигналу піддається кореляційній обробці, в результаті якої визначаються такі параметри іоносфери: температури іонів  $T_i$  і електронів  $T_e$ , вертикальна складова швидкості руху іоносферної плазми  $V_z$  та ін. Виміряна потужність луна-сигналу від короткого імпульса використовується для обчислення нормованого висотного профіля концентрації електронів  $N_e/N_{mF2}$ . Профіль концентрації електронів  $N_e$  визначається за допомогою інформації про критичну частоту радіохвилі звичайної поляризації, яка вимірюється за допомогою іонозонду. Інтервал обробки сигналу

складає 15 хв. При цьому похибки визначення  $N_e$ ,  $T_i$  і  $T_e$  складали від 1 % до 10 %, а  $V_z$  – від 1 м/с до 30 м/с для висотного діапазона 200 км – 600 км відповідно у залежності від висоти, часу доби та стану іоносфери.

### **1.8.2 Багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери**

Для спостереження за станом іоносфери на висотах від ~100 км до 300 – 400 км над Північно-Китайським регіоном використовувався багаточастотний радіотехнічний комплекс дистанційного похилого багатотрасового зондування іоносфери. Комплекс був розроблений дослідниками ХНУ імені В. Н. Каразіна (Україна) і Харбінського інженерного університету (КНР) в середині 2018 р. з метою проведення одночасних сумісних спостережень у просторово рознесених середньоширотних регіонах для виявлення характеристик глобальних (понад 10000 км) збурень. Комплекс працює в режимі моніторингу. Він розташований на території Харбінського інженерного університету (45.78°N, 126.68°E).

Комплекс [270] складається з активної антени, що працює в діапазоні частот 10 кГц – 30 МГц, широкосмугового радіоприймального пристрою типу USRP N210 фірми Ettus Research (США) з дочірніми платами LFRX/LFTX і персонального комп'ютера. При розробці комплексу використана технологія програмного радіо. Для успішного функціонування комплексу в середовищі GNU Radio було розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке залежить від кола вирішуваних задач.

Радіоприймальний пристрій за допомогою зазначеної антени приймає сигнали мережі широкого мовлення, або спеціальних радіостанцій в діапазоні від 10 кГц до 30 МГц. Кількість радіотрас і їх орієнтація залежать від специфіки вирішуваних завдань. На теперішній час комплекс здійснює моніторинг на 14 радіотрасах різної орієнтації (рис. 1.3). Основні відомості про радіостанції наведені в табл. 1.12. Для вивчення розподілу процесу, що досліджується, по горизонталі використовувалися радіотраси з різним азимутальним кутом. Для

дослідження висотної залежності для одного і того ж географічного розташування радіостанцій застосовувалися кілька різних частот. Наприклад, для радіостанцій, розташованих в Японії, використовувалися дві частоти 6055 кГц і 9750 кГц. Радіохвиля з меншою частотою відбивалася переважно в Е-області іоносфери, а радіохвиля з більшою частотою – в F-області іоносфери.

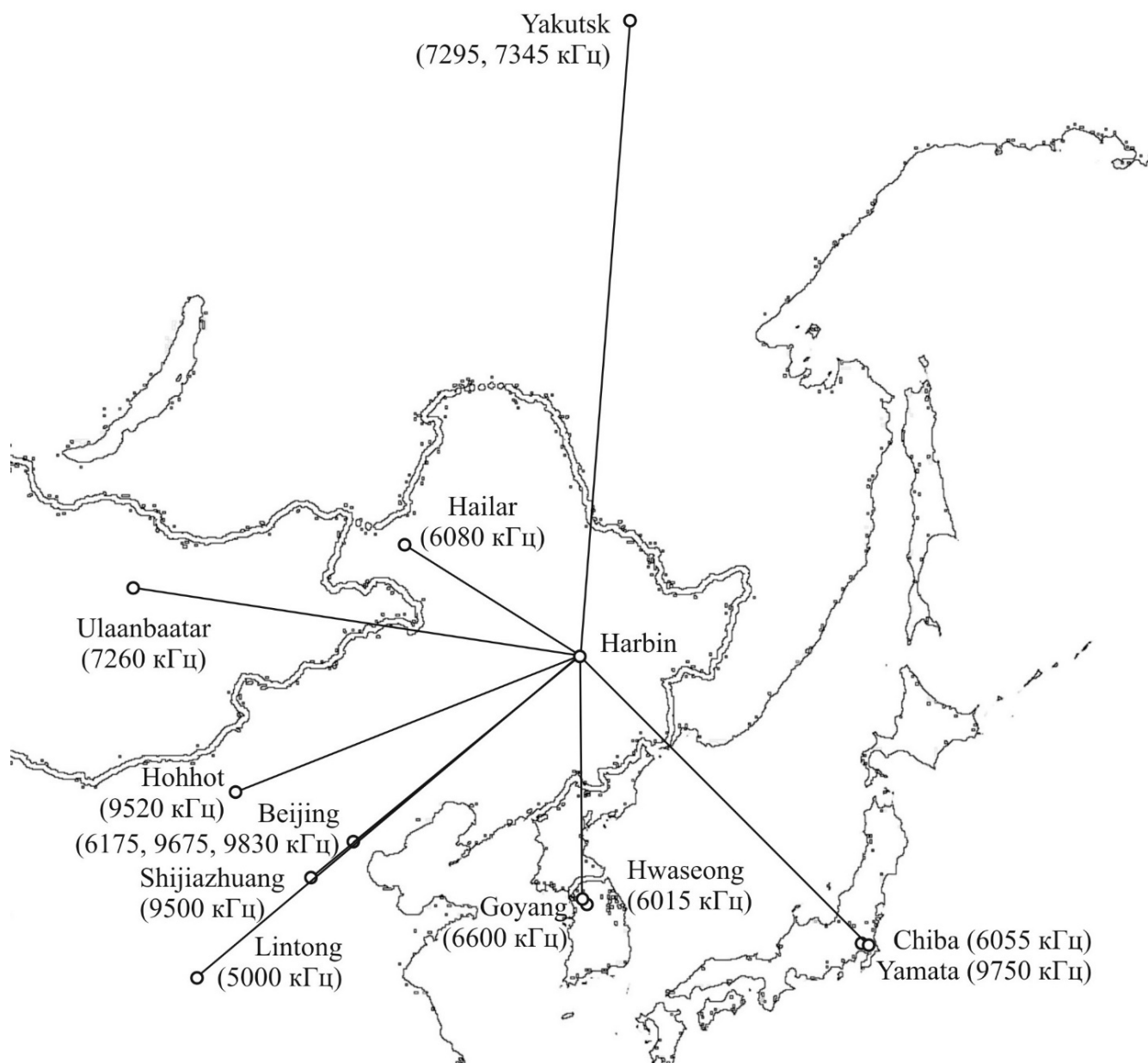


Рис. 1.3. Схема розташування радіотрас для моніторингу динамічних процесів в іоносфері над Китаєм



**Основні відомості про радіотраси** [<https://fmscan.org/index.php>]

Частота, кГц	Координати передавача,	Місто розташування (територія)	Відстань до Харбіну, км	Координати середини траси
5000	34.95°N, 109.56°E	Lintong/ Pucheng (Китай)	1875	40.37°N, 118.12°E
6015	37.21°N, 126.78°E	Hwaseong (Південна Корея)	950	41.50°N, 126.73°E
6055	35.47°N, 140.21°E	Chiba/Nagara (Японія)	1610	40.63°N, 133.45°E
6080	49.18°N, 119.72°E	Hailar/Nanmen (Китай)	645	47.48°N, 123.2°E
6175	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E
6600	37.60°N, 126.85°E	Goyang (Південна Корея)	910	41.69°N, 126.77°E
7260	47.80°N, 107.17°E	Ulaanbaatar/ Khonkhor (Монголія)	1496	46.79°N, 116.93°E
7295	62.24°N, 129.81°E	Yakutsk (Росія)	1845	54.01°N, 128.25°E
7345	62.24°N, 129.81°E	Yakutsk (Росія)	1845	54.01°N, 128.25°E
9500	38.47°N, 114.13°E	Shijiazhuang (Китай)	1310	42.13°N, 120.41°E
9520	40.72°N, 111.55°E	Hohhot (Китай)	1340	43.25°N, 119.12°E
9675	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E
9750	36.17°N, 139.82°E	Yamata (Японія)	1570	40.98°N, 133.25°E
9830	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E

В основі функціонування комплексу лежать вимірювання величини доплерівського зміщення частоти  $f_d$ , яка змінюється в межах від  $\sim 0,01$  Гц до  $\sim 1$  Гц. Вимірювання на комплексі ведуться безперервно. У файлах на жорсткому диску після цифрових гетеродинування та фільтрації зберігаються відліки

прийнятих сигналів кожної станції в темпі 50 відліків за секунду. Далі на інтервалі часу 20 с розраховуються доплерівські спектри.

Для спектрального аналізу використовується авторегресійний алгоритм [271]. Це дозволило підвищити точність визначення частоти окремих спектральних складових до 0.02 Гц. Далі будується часова залежність доплерівських спектрів для кожної радіотраси. Роздільна здатність цієї залежності по часу становить 7.5 с. Локальні максимуми  $f_d$  у послідовності спектрів, які відповідають різним модам (просторовим чи поляризаційним) радіосигналу, виділяються та групуються в окремі часові ряди. В подальшому такі ряди піддаються подальшій обробці (наприклад, вейвлет-аналізу, фрактальному аналізу та ін.).

## Висновки до розділу 1

1. Адекватне дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних впливом високоенергетичних джерел, доцільно й обґрунтовано проводити в рамках системної парадигми, що враховує динамічні та нелінійні властивості відкритих систем ЗАІМ і СМСМІАЗ.

2. Продемонстровано, що цілий ряд джерел природної та техногенної природи мають значну енергетику, в результаті чого виникає взаємодія підсистем в системах ЗАІМ і СМСМІАЗ.

3. Продемонстровано, що землетрус супроводжується сейсмічним, тепловим, електричним, електромагнітним ефектами, генерацією сейсмічних, інфразвукових, внутрішніх гравітаційних і електромагнітних хвиль, варіаціями геофізичних полів. Генеровані в процесі підготовки або протягом землетрусу збурення геофізичних полів і хвилі поширюються в атмосфері, іоносфері та магнітосфері, викликають вторинні ефекти і взаємодії підсистем в системі ЗАІМ. До вторинних ефектів відносяться іонізація приземної атмосфери радіоактивними газами, збурення параметрів глобального електричного кола, Джоулев нагрів іоносферної плазми, генерація ВГХ на іоносферних висотах, збурення іоносферно-магнітосферної плазми, системи іоносферно-магнітосферних струмів і

іоносферно-магнітосферного електричного поля, збудження нестійкостей і турбулентності, генерація електромагнітних шумів у широкому діапазоні частот (від УНЧ до ВЧ), утворення іоносферно-магнітосферних дактів, висипання енергійних частинок з магнітосфери та ін. Фізичні процеси, передуючі землетрусу (передвісники), у цілому подібні до процесів, які спостерігаються протягом землетрусів. Хоча передвісники мають меншу енергетику, зазвичай вони є спостережуваними.

4. Обґрунтовано положення про те, що тропічний циклони – одне з систематично виникаючих найвисокоенергетичніших великомасштабних атмосферних утворень на нашій планеті – є елементом системи океан – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Тропічні циклони відіграють визначальну роль у глобальному масо- та енергообміні в зазначеній системі, підтримують сприятливий для людини клімат на нашій планеті.

До цього часу побудовано основи схематизованої моделі основних процесів у системі океан – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Продемонстровано, що підсистеми та вся система в цілому є нелінійними. Вказані основні механізми взаємодії підсистем. Між підсистемами мають місце прямі та зворотні зв'язки. Виникаючі при цьому процеси характеризуються значною енергетикою. Вплив циклону на верхню атмосферу, іоносферу та магнітосферу здійснюється, принаймні, по трьох каналах: акустико-гравітаційному, електромагнітному та електричному, з якими пов'язані генерація хвиль і полів відповідної природи.

5. Дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур – найважливіший науковий напрям у космічній геофізиці. З огляду на багатогранність проявів геокосмічних бур, через відносну індивідуальність і унікальність кожної бурі вивчення фізичних ефектів геокосмічних бур далеко до завершення. Крім задач всебічного дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур, необхідно їх детальне адекватне моделювання та прогнозування.

6. Проліт і вибух Челябінського метеороїда викликав цілий комплекс як короткоіснуючих ( $\sim 1$  с), так і довгоіснуючих (години, тижні і навіть багато місяців) фізичних (і не тільки фізичних) процесів в системі магнітосфера –

іоносфера – атмосфера – Земля (внутрішні оболонки). Висота основного енерговиділення приблизно дорівнювала 23 км. В процесі вивчення фізичних ефектів, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда, виявлено кілька нових явищ. Вперше приблизно на широті Челябінська спостерігався довгоіснуючий (кілька місяців) пояс пилу. Вперше спостерігалися кам'яні нитки базальту або піроксену, що утворилися при високотемпературному руйнуванні Челябінського космічного тіла. Вперше встановлено, що за 50–30 хв до вибуху метеороїда, тобто при його русі в магнітосфері, а потім в термосфері та іоносфері, швидше за все, виникли первинні ефекти. Проліт і вибух Челябінського тіла в стратосфері викликав вторинні ефекти в літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, тобто у всій системі ЗАІМ. Важливо, що збурення, викликані вибухом Челябінського тіла, поширювалися як по вертикалі на сотні кілометрів вгору, так і по горизонталі на відстані в тисячі кілометрів. Реєстровані збурення виникли не тільки в атмосфері, але й в іоносфері, а також геомагнітному полі, тобто в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля.

7. Старти і польоти ракет з працюючими двигунами, маневри та посадка космічних апаратів є зручним, гнучким і перспективним різновидом активних експериментів у системі ЗАІМ. Важливо, що ракетно-космічна техніка (РКТ), що запускається з різних космодромів світу, яка має різну потужність, різний склад палива та різні траєкторії, забезпечує варіювання «початкових умов» і гнучкість у дослідженні реакції підсистем і системи ЗАІМ в цілому. РКТ справляє комплексний вплив на підсистеми в системі ЗАІМ, а саме сейсмічний, динамічний, тепловий, акустичний, магнітогідродинамічний та електромагнітний впливи. Тому канали впливу РКТ на систему ЗАІМ надзвичайно різноманітні. Вони являють собою цілий ряд пов'язаних між собою груп. Кожна група асоціюється з певними фізичними процесами і збуреннями в системі ЗАІМ. У літературі основна увага приділялася хвильовим процесам, які супроводжували старти і маневри РКТ. Саме ці процеси найбільш суттєві на великих (~1–10 тис. км) віддаленнях від траєкторії РКТ. Хвильові процеси призводять до взаємодії підсистем у системі ЗАІМ. АГХ, що генеруються в атмосфері,

зумовлюють виникнення РІЗ. Останні викликають квазіперіодичну модуляцію іоносферних струмів і, в кінцевому підсумку, генерацію геомагнітних пульсацій з відповідними періодами. Крім ударних хвиль і АГХ, польоти РКТ служать джерелом й інших хвиль, швидкості яких складають одиниці, а можливо, й десятки кілометрів за секунду. Ними можуть бути як повільні МГД, так і гіротропні хвилі. І ті, й інші спостерігалися не так впевнено, як ударні хвилі й АГХ. Крім наукової значущості, ефекти, що супроводжували функціонування РКТ, мають і прикладну значимість. Для радіофізики та радіофізичних застосувань важливо, що збурення в навколоземному середовищі суттєво впливають на поширення радіохвиль ДНЧ – ДВЧ діапазонів, а значить і на роботу систем телекомунікацій, радіолокації, дистанційного радіозондування та моніторингу середовищ. Плазма факела ракети суттєво змінює провідність, відбивні та розсіюючі властивості середовища, суттєво змінюючи параметри радіоканалів. Дослідження викликаних польотами РКТ збурень в атмосфері та геокосмосі, засмічення геокосмосу сміттям і чужорідною речовиною будуть ще довго залишатися актуальними.

## РОЗДІЛ 2

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ГЕОКОСМОСІ В СВІТЛІ СИСТЕМНОЇ ПАРАДИГМИ

#### 2.1. Загальні відомості

Найважливішим досягненням фізики Землі, атмосфери та геокосмосу на рубежі XX – XXI століть стало усвідомлення того факту, що якісно нове розуміння процесів, що спостерігаються у внутрішніх і зовнішніх оболонках нашої планети, а значить і побудова їх адекватних фізико-математичних моделей, було неможливим в рамках колишньої парадигми, коли зазначені оболонки розглядалися, як правило, ізольованими одна від одної. Якщо ж взаємодія між двома оболонками і враховувалася, зазвичай вона вважалася лінійною. Виявилося, що жодна оболонка не є самодостатньою, так як її миттєвий стан не визначає її еволюцію в майбутньому.

Основи системної парадигми сформульовані Л. Ф. Чорногором у 1980-х рр. і розвинені в роботах [1–5, 10, 19, 21, 272–277]. У цих роботах обґрунтовано, що системи ЗАІМ і СМСМІАЗ слід розглядати як відкриті динамічні і, головне, нелінійні системи з властивими їм нетривіальними властивостями. На відміну від підсистеми, система має більший ступінь самодостатності та результат її еволюції може бути передбачений більш визначеним чином на основі її миттєвого стану. Термін «передбачений» зрозумілий для детермінованих систем. Для систем з можливими хаотичними режимами його слід розуміти в широкому сенсі. У цьому випадку вдається передбачити моменти часу переходу до хаотичного режиму, інтервали параметрів його існування, типи хаотичних структур і т. п.

#### 2.2 Основні положення системної парадигми

Перелічимо основні положення системної парадигми.

1. Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) і Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) утворюють єдину природну систему, яка описує роль потоків енергії, речовини та випромінювання «зверху».

2. Земля та навколоземне середовище утворюють єдину природну систему. Вона складається з підсистем – внутрішніх і зовнішніх геосфер. Підсистеми тектоносфера, атмосфера, іоносфера та магнітосфера, а також океан, атмосфера, іоносфера та магнітосфера формують системи ТАІМ і ОАІМ, а разом – систему ЗАІМ. Система ЗАІМ описує роль потоків енергії, речовини та випромінювання «знизу».

3. Між складовими частинами систем СМСМІАЗ і ЗАІМ мають місце різноманітні зв'язки (прямі та зворотні, позитивні та негативні, їх комбінації).

4. СМСМІАЗ і ЗАІМ – відкриті системи. У них надходить випромінювання, речовина, енергія й ентропія як «знизу», так і «зверху».

5. СМСМІАЗ і ЗАІМ – динамічні системи. Їх узагальнені параметри змінюються в часі та просторі. Тому системи описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних із початковими та граничними умовами, заданими з кінцевою похибкою.

6. СМСМІАЗ і ЗАІМ – нелінійні системи, що є результатом протікання високоенергетичних процесів. Початкові співвідношення, що описують відповідні фізико-хімічні процеси, є нелінійними. Це призводить до біфуркацій, нестійкості систем, виникненню хаотичних режимів, самоорганізації, тригерності, появи впорядкованих структур і т. п.

7. Системи СМСМІАЗ і ЗАІМ мають здатність до саморозвитку, ускладнення та самоорганізації за рахунок використання зовнішніх джерел енергії, випромінювання, маси і т. д.

### 2.3 Взаємодія підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ

Для розуміння взаємодії підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ спочатку наведемо результати розрахунків густин потоків енергії від різних джерел (табл. 2.1, табл. 2.2). Із цих таблиць видно, що густини потоків можуть бути сумірними для потоків «зверху» та «знизу».

Таблиця 2.1

#### Енергетичні характеристики потоків «зверху» [1–5, 21, 272–277]

Переносник	$P_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Тривалість, с	Примітка
Випромінювання спокійного Сонця:  • оптичне; • ультрафіолетове і м'яке рентгенівське; • жорстке рентгенівське	1400  $\sim 2 \cdot 10^2$  $\sim 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{14}$ $1.3 \cdot 10^{14}$ $1.3 \cdot 10^{14}$	$1.8 \cdot 10^{17}$ $\sim 3 \cdot 10^{16}$ $\sim 10^6$	Неперервно	Довжина хвилі  $\lambda \approx 0.4 - 0.8$ мкм $\lambda \approx 1$ нм – 0.4 мкм  $\lambda \approx 0.5 - 1$ нм
Випромінювання збуреного Сонця:  • оптичне; • ультрафіолетове і м'яке рентгенівське;  • жорстке рентгенівське	1400  $\sim 2 \cdot 10^2$  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{14}$ $1.3 \cdot 10^{14}$ $1.3 \cdot 10^{14}$	$1.8 \cdot 10^{17}$ $\sim 3 \cdot 10^{16}$ $\sim 6.5 \cdot 10^{10}$	$\sim 10^2$ $\sim 10^2$ $\sim 10^2$	$\lambda \approx 0.4 - 0.8$ мкм $\lambda \approx 1$ нм – 0.4 мкм  $\lambda \approx 0.5 - 1$ нм
Сонячні протони:  • спокійні умови;  • збурені умови	0.1  2 – 3	$10^{16}$  $10^{16}$	$10^{15}$  $(2 - 3) \cdot 10^{16}$	Неперервно  $10^2 - 10^5$	Енергія протонів  10 – 100 МеВ Густина потоку $10^{11} - 10^9$ м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> , $(2 - 3) \cdot 10^{12}$ м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> .



Продовження таблиці 2.1

Переносник	$P_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Тривалість, с	Примітка
Сонячний вітер: • спокійний;  • збурений	$6 \cdot 10^{-5}$  $5 \cdot 10^{-2}$	$10^{16}$  $10^{16}$	$6 \cdot 10^{11}$  $5 \cdot 10^{14}$	  $4 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$N_p \approx 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ , $v_p \approx 400 \text{ км/с}$ .  $N_p \approx 10^8 \text{ м}^{-3}$ , $v_p \approx 1000 \text{ км/с}$ .
Галактичні космічні промені	$10^{-6}$	$\sim 10^{14}$	$10^8$	Неперервно	Густина потоку $10^4 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , енергія протонів $\varepsilon_p = 1 \text{ Гев}$
Метеорні потоки: • фон; • найсильніший дощ	$5 \cdot 10^{-7}$  $5 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^{14}$  $\sim 10^{14}$	$\sim 5 \cdot 10^7$  $\sim 5 \cdot 10^{12}$	Неперервно  $10^3 - 10^4$	Маси частинок: $m \geq 10^{-10} \text{ кг}$  Те ж
Високоенергійні частинки, що висипаються: • спокійні умови; • збурені умови	$10^{-4}$  1	$\sim 10^{13}$  $\sim 10^{13}$	$10^9$  $\sim 10^{13}$	$10^2 - 10^4$  $10^2 - 10^4$	Високі широти  Те ж
Інфрачервоне випромінювання термосфери: • спокійні умови; • збурені умови	$10^{-3} - 10^{-2}$  0.1 – 1	$5 \cdot 10^{14}$  $5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{12}$  $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$	Неперервно  $10^2 - 10^4$	$\lambda = 2 - 10 \text{ мкм}$  Сильніше у високих широтах

Взаємодія підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ здійснюється за допомогою: 1) потоків випромінювання, плазми, частинок; 2) хвиль різної фізичної природи, що модулюють параметри середовища та які перетворюються одна в одну;

**Енергетичні характеристики потоків „знизу” [1–5, 21, 272–277]**

Переносник	$P_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Трива- лість, с	Примітка
Інфрачервоне випромінювання поверхні Землі	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{17}$	Неперер- вно	Поглинається й випромінюється атмосферою
Водяна пара	80	$5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{16}$	Те ж	При конденсації виділяється тепло в атмосфері
Конвекція	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1.5 \cdot 10^{16}$	Те ж	
Потік тепла з надр Землі	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	Те ж	Відіграє незначну роль
Атмосферна турбулентність	1 – 10	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$	Те ж	До висот ~100 – 120 км
Внутрішні гравітаційні хвилі (ВГХ)	0.1 – 1	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$	Те ж	Ефективно дисипують у термосфері
Приливні хвилі	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11}$	Те ж	Те ж
Планетарні хвилі	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{11}$	Те ж	Те ж
Інфразвук	$10^{-4} - 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{11}$	Те ж	Досягає F-області іоносфери
Інфразвук від найсильнішого землетрусу	$10^2 - 10^3$	$10^{11}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^2$	Те ж

3) квазістатичних електромагнітних полів; 4) потоків частинок з іоносфери в плазмосферу та, навпаки, з плазмосфери в атмосферу;

Продовження таблиці 2.2

Переносник	$P_R$ , Вт/м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	$P$ , Вт	Трива- лість, с	Примітка
Електромагнітне випромінювання найсильнішого землетрусу	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{11}$	$10^8 - 10^9$	$10^2 - 10^3$	Досягає іоносфери та магнітосфери
Акустичне випромінювання найсильнішої блискавки	$10^{-3}$	$10^9$	$10^6$	~1	Дисипує в атмосфері
Електромагнітне випромінювання найсильнішої блискавки	$10^{-3}$	$10^9$	$10^6$	~1	Досягає іоносфери та магнітосфери
Акустичне випромінювання світової грозової активності	$10^{-3}$	$10^{12}$	$10^9$	Неперер- вно	Дисипує в атмосфері
Електромагнітне випромінювання світової грозової активності	$10^{-3}$	$10^{12}$	$10^9$	Те ж	Досягає іоносфери та магнітосфери

5) високоенергійних частинок, що висипаються з магнітосфери.

Хвильові збурення (ХЗ) займають видне місце в системному підході до дослідження утворень СМСМІАЗ і ЗАІМ (табл. 2.3) [246, 247]. ХЗ є не тільки переносником енергії та імпульсу в системах, вони також служать індикатором її стану і варіацій атмосферно-космічної погоди.

Експериментально і теоретично показано, що висипання енергійних електронів у середніх широтах супроводжує більшість нестаціонарних процесів в

Таблиця 2.3

**Типи хвиль, що переносять збурення на глобальні відстані [1–5, 246, 247, 278]**

Тип хвилі	Фазова швидкість, м/с	Період, с	Декремент загасання, км <sup>-1</sup>	Середовище поширення
Акустична	0.3–0.7	10 <sup>-2</sup> –300	10 <sup>2</sup> –10 <sup>-5</sup>	Атмосфера (≤400 км)
ВГХ	0.3–0.7	>300	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-3</sup>	Атмосфера (≤400 км)
Повільна	10 <sup>2</sup> –1	1–10 <sup>4</sup>	2·10 <sup>-3</sup> –2·10 <sup>-4</sup>	Е-область іоносфери
Тип хвилі	Фазова швидкість, м/с	Період, с	Декремент загасання, км <sup>-1</sup>	Середовище поширення
МГД	3·10 <sup>2</sup> –10	1–10 <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-4</sup>	Ф-область іоносфери
Тип хвилі	Фазова швидкість, м/с	Період, с	Декремент загасання, км <sup>-1</sup>	Середовище поширення
Сейсмічна				
– поздовжня	6.5–7.5	0.1–30	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	Літосфера
– поперечна	4–5	Те ж	Те ж	Те ж
Тип хвилі	Фазова швидкість, м/с	Період, с	Декремент загасання, км <sup>-1</sup>	Середовище поширення
Хантадзе				Е-область іоносфери
– день	~1	3·10 <sup>4</sup> –2·10 <sup>5</sup>	Не оцінювався	іоносфери
– ніч	~20	5·10 <sup>2</sup> –2.4·10 <sup>3</sup>	Те ж	Те ж
Тип хвилі	Фазова швидкість, м/с	Період, с	Декремент загасання, км <sup>-1</sup>	Середовище поширення
Гіротропна				Е-область іоносфери
– день	40–25	10–10 <sup>4</sup>	Не оцінювався	іоносфери
– ніч	750	10–10 <sup>4</sup>	Те ж	Те ж
МГД	~1000	> 10 <sup>-2</sup>	< 10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-4</sup>	Іоносфера, магнітосфера

системі ЗАІМ [1–5, 19, 21, 278]. Їх потоки складають величину порядку  $10^7$ – $10^9$   $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  (табл. 2.4). Обґрунтовано механізми, що призводять до висипання частинок.

До них відносяться вповільнення енергійних електронів в іоносферно-магнітосферному квазістатичному електричному полі й передача їх енергії шумовому ДНЧ-випромінюванню.

Активні експерименти виявилися зручними для вивчення як системи ЗАІМ в цілому, так і взаємодії її підсистем. При цьому стає можливим дозувати величину енерговиділення, обирати для нього місце й час, що зазвичай неможливо при дослідженні природних процесів у системі ЗАІМ [1–5, 21, 272–277].

Таблиця 2.4

**Параметри потоків енергійних частинок, що висипаються і вироблена ними іонізація [1–5, 278]**

Подія	Дата	Вид частинок	Висота, км	$\Delta N$ , $\text{м}^{-3}$	$q$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Delta q$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Pi$ , $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\varepsilon$ , кеВ
Магнітна буря	15.05.97	електрони	84	$0.5 \cdot 10^9$	$1.4 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^7$	$3.8 \cdot 10^8$	60
Протонний спалах	25.02.91	електрони (протони)	72.5	$5 \cdot 10^9$	$10^7$	$35 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^9$ ( $1.2 \cdot 10^7$ )	150 (20000 )
Сонячний термінатор (вечір)	24.05.97	електрони	80	$10^9$	$10^7$	$3 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^8$	80
Сонячний термінатор (ранок)	25.05.97	електрони	80	$6 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^8$	80
Середина ночі	25.05.97	електрони	90	$3 \cdot 10^8$	–	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	40

Продовження таблиці 2.4

Подія	Дата	Вид частинок	Висота, км	$\Delta N$ , $\text{м}^{-3}$	$q$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Delta q$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Pi$ , $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\varepsilon$ , кеВ
Затемнення Сонця	11.08.99	електрони	84	$5 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^7$	60
Землетрус	24.08.99	електрони	84	$4 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^6$	$6.6 \cdot 10^7$	60
Старт ракети	15.05.87	електрони	80	$10^9$	$3 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^8$	80
Потужне радіо-випромінювання	01.03.91	електрони	88	$3 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^8$	40

## Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано, що утворення СМСМІАЗ і ЗАІМ є складними відкритими динамічними нелінійними та стохастичними системами.

Розвинені основні положення системної парадигми.

2. До найважливіших властивостей систем СМСМІАЗ і ЗАІМ відноситься їх нелінійність, можливість самоорганізації, хаотизації та появи тригерних механізмів вивільнення енергії.

Важливо, що потоки енергії «зверху» і «знизу», а також від антропогенних джерел можуть бути порівнянними.

3. Високоенергійні явища (землетруси, вулканізм, грози, потужні атмосферні процеси, тропічні циклони, термінатор, затемнення Сонця, спалахи на Сонці, геокосмічні бурі і т.п.) викликають комплекс процесів у системах СМСМІАЗ і ЗАІМ, призводять до перебудови характеру взаємодій підсистем, до накопичення й вивільнення енергії.

4. Активні експерименти (вибухи, старту ракет і т.п.) виявляються зручними й ефективними засобами для моделювання взаємодії підсистем.

5. Особлива роль у взаємодії підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ належить хвильовим процесам. Виявлено типи хвиль, які супроводжують взаємодію підсистем.

6. Висипання енергійних електронів у середніх широтах супроводжує більшість нестационарних процесів у системах СМСМІАЗ і ЗАІМ. Їх потоки складають величину порядку  $10^7\text{--}10^9\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Виявлено й обґрунтовано механізми, що призводять до висипання частинок.

7. Системна парадигма повинна стати основою теорії, методом і методологією вивчення систем СМСМІАЗ і ЗАІМ як складних відкритих дисипативних динамічних нелінійних об'єктів.

Результати цього розділу відображені в роботах автора [272–277].

## РОЗДІЛ 3

# ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ Й ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ ВПЛИВОМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

### 3.1 Загальні відомості

До високоенергетичних джерел збурень в атмосферно-іоносферних радіоканалах відносяться, зокрема, падіння великих космічних тіл, динамічні процеси у мезосфері та дія нестаціонарного потужного радіовипромінювання різних частотних діапазонів.

Прикладом недавніх падінь космічних тіл є проліт Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р., який являв собою найбільш небезпечний удар космічного тіла за останнє сторіччя, а також Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р.

Мезосфера є важливою та найменш вивченою областю відкритої динамічної системи Земля – атмосфера – геокосмос. Вона бере участь у формуванні погоди в нижній атмосфері (тропосфері та стратосфері) та космічної погоди, сприяючи взаємодії цих погодних систем [2, 3]. Мезосфера використовується в якості радіоканалів. Експериментально підтверджено, що фізико-хімічні процеси в мезосфері мають яскраво виражений нестаціонарний характер. Це пояснюється рядом причин. По-перше, в мезосфері має місце висока динамічна активність, що супроводжується значним енерговиділенням. Справа в тому, що системи мезосферних вітрів є своєрідним фільтром атмосферних хвиль, джерела яких розташовані в тропосфері, на Землі та під її поверхнею. Дисипація і відбиття хвиль сприяють розвитку інтенсивної турбулентної структури. По-друге, стан мезосфери в значній степені контролюється нестаціонарними процесами на Сонці. Нарешті, наявність від'ємного висотного градієнта температури сприяє розвитку різного роду нестійкостей.



Вплив потужного радіовипромінювання на навколоземну плазму (іоносферу та магнітосферу) також займає важливе місце серед активних експериментів у геокосмосі [289–292]. Широкі теоретичні дослідження в цьому напрямку були проведені ще в 1950–1960 рр. Результати теоретичних досліджень детально описані в монографіях [289, 290], а також у цілій низці робіт А. В. Гуревича та інших авторів [289–292].

### **3.2 Фізичні процеси в атмосфері й іоносфері, які супроводжували падіння Челябінського метеороїда**

Опишемо коротко фізичне моделювання процесів в атмосфері й іоносфері, які були викликані падінням Челябінського метеороїда [283, 287].

Рух метеороїда в атмосфері Землі описується відомими рівняннями гальмування, втрати маси, зміни кута падіння, висоти і світіння тіла (див., наприклад, [181, 186]). Ці рівняння розв'язувалися числовими методами з урахуванням дроблення космічного тіла. Вважалося, що початкова форма тіла близька до кулястої. Вважалося також, що коефіцієнти динамічного опору  $C_d$ , теплообміну  $C_h$  і світності  $\tau$  у процесі руху тіла залишались незмінними ( $C_d = 1$ ,  $C_h = 0.02$  і  $\tau = 0.2$ ). Питома теплота сублімації покладалася рівною 1.5 МДж/кг. Приймалась експоненційна модель атмосфери з масштабом  $H = 7.5$  км.

Початкова кінетична енергія космічного тіла виявилася близька до  $1.88 \cdot 10^{15}$  Дж. Така енергія виділяється при вибусі 0.44 Мт тринітротолуолу. Енергія вибуху Челябінського боліда була еквівалентна вибуху 35 бомб, скинутих у 1945 р. на Хіросіму.

Основне виділення енергії падаючого тіла відбувалося в шарі атмосфери товщиною близько 22 км. Тоді середня погонна густина енергії  $8.5 \cdot 10^{10}$  Дж/м.

Характерний час енерговиділення склав 1.2 с. При цьому характерна потужність процесу дорівнювала 1.6 ПВт.

Розглянемо руйнування метеороїда. У верхній частині траєкторії кам'яний метеороїд зазнавав луцення, на висотах 20 – 35 км – дроблення. Спочатку кулеподібне тіло боліда поступово перетворювалося у дископодібне тіло з міделем, який поступово збільшується. Продукти дроблення далі рухалися як квазірідина. Космічне тіло руйнується за умови, що динамічний тиск на нього порівнюється з міцністю речовини тіла. Різні частини боліда мають різну міцність, тому міцність кам'яного метеорита (хондритів) змінюється в широких межах:  $\sigma = 10^6 - 10^7 \text{ Н/м}^2$  [173]. Умова руйнування виконується на висотах, де  $\rho \approx 5.8 \cdot 10^{-3} - 5.8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ . Їм відповідає діапазон висот 37 – 22 км. Приймалось, що дроблення метеороїда починалось на висоті  $z_0 \approx 37 \text{ км}$ , а закінчувалось на висоті близько 20 км. Після початку дроблення фрагменти рухались як квазірідина, набуваючи поперечну швидкість порядку 1 – 10 м/с.

Результати розрахунку міделя  $S$ , швидкості боліда  $v$  та швидкості втрати його маси  $dm/dt$  наведені в табл. 3.1. Із таблиці видно, що основна втрата маси боліда мала місце на висотах 23 – 27 км.

Розглянемо оптичне випромінювання боліда. Інтегральна енергія випромінювання  $E_r$ , яка була визначена за допомогою сенсорів, встановлених на геостаціонарних ШСЗ США, виявилась близькою до  $3.75 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$  [293–295]. При ефективній тривалості імпульсу випромінювання 1.2 с маємо пікову потужність випромінювання 313 ТВт.

Оцінимо далі густину потоку енергії оптичного випромінювання. Вважаючи, що випромінювання здійснюється від тонкого диску, площа поверхні якого близька до  $4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ , отримуємо, що густина потоку  $7.8 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ . Густина потоку потужності поблизу епіцентру з урахуванням поглинання в атмосфері близька до  $1.9 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ . Густина потоку світла більш ніж на порядок перевищувала густина

потіку світла від Сонця (близько  $500 \text{ Вт/м}^2$ ). Якби область вибуху мала властивості абсолютно чорного тіла, то його температура при вказаних значеннях густини потоку дорівнювала б  $1.9 \cdot 10^4 \text{ К}$ . При цьому максимум випромінювання припадав на довжину хвилі близько  $1.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Насправді, випромінювання нагрітого тіла швидше об'ємне, ніж поверхневе. У будь-якому випадку його температура порядку  $10^4 \text{ К}$ .

Таблиця 3.1

**Висотна залежність густини атмосфери, основних кінематичних і енергетичних параметрів боліда ( $E_k$  і  $P$  – кінетична енергія та потужність гальмування боліда)**

$z$ , км	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$S$ , м <sup>2</sup>	$v$ , км/с	$m$ , кг	$-\frac{dm}{dt}$ , кг/с	$E_k$ , ТДж	$P$ , ПВт
18	0.1	$7.5 \cdot 10^4$	0.07	3.5	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
19	0.086	$6.3 \cdot 10^4$	0.45	3.5	$3.3 \cdot 10^{-3}$	0.35	$2.5 \cdot 10^{-4}$
20	0.073	$5.2 \cdot 10^4$	1.7	3.54	0.1	5.1	$9.5 \cdot 10^{-3}$
21	0.065	$4.36 \cdot 10^4$	4.6	3.76	1.84	40	0.16
22	0.053	$3.6 \cdot 10^4$	8.3	4.41	7.82	152	0.86
23	0.049	$3 \cdot 10^4$	11.6	5.5	15.3	370	2.2
24	0.041	$2.4 \cdot 10^4$	14.3	6.94	19.2	710	3.3
25	0.034	$2 \cdot 10^4$	15.9	8.16	18.2	1030	3.7
27	0.024	$1.25 \cdot 10^4$	17.6	9.87	10.9	1530	2.5
30	0.016	$5.8 \cdot 10^3$	18.4	10.9	3.85	1845	0.94
32	0.013	$3.1 \cdot 10^3$	18.5	11	1.7	1880	0.42
35	$8 \cdot 10^{-3}$	922	18.5	11	0.3	1880	0.076
37	$5.8 \cdot 10^{-3}$	254	18.5	11	0.06	1880	0.015

Розглянемо параметри ударної хвилі. Будемо вважати, що основне вибухоподібне енерговиділення мало місце поблизу висоти 25 км (див. табл. 3.1). У припущенні, що вибух був циліндричним, обчислення радіуса ударної хвилі дало  $R_s \approx 0.43$  км. Для ударної хвилі циліндричного типу в експоненційній атмосфері надлишковий тиск під епіцентром вибуху є близьким до 2.4 кПа. Залежність надлишкового тиску  $\Delta p(R)$  наведена у табл. 3.2 ( $R_0$  – відстань від епіцентру уздовж поверхні Землі). Видно, що аж до відстаней в 100 км ударна хвиля залишається досить сильною, щоб викликати часткові руйнування. Оцінки  $\Delta p_s(R)$  для сферичної на досить великих відстанях хвилі також наведені в табл. 3.2. При надлишковому тиску в 1 кПа площа часткових пошкоджень близька до 6 тис. км<sup>2</sup>.

Таблиця 3.2

**Залежність тиску в ударній хвилі від відстані ( $S_d = \pi R_0^2$  – площа пошкоджень і руйнувань)**

$R$ , км	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$R_0$ , км	0	16.6	31.2	43.3	54.5	65.4	76	86.5	96.8
$\Delta p$ , кПа	2.4	2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.26	1.2
$\Delta p_s$ , кПа	2.4	1.8	1.3	1	0.9	0.75	0.66	0.59	0.53
$S_d$ , км <sup>2</sup>	0	855	$3.1 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^3$	$9.3 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^4$

Поширення ударної хвилі вгору призвело до збурення верхньої атмосфери. Результати розрахунку висотної залежності  $\Delta p(z)$  наведені у табл. 3.3. Із таблиці видно, що по мірі збільшення висоти надлишковий тиск у фронті ударної хвилі досить швидко зменшується. Відносний надлишковий тиск на висотах більше 50 км збільшується. Реально величина надлишкового тиску буде трохи менше, тому що при розрахунках не враховувалася дисипація енергії хвилі.

Енергія ударної хвилі поширюється в горизонтальному напрямку. Так, за сферичної розбіжності на висоті 300 км і відстані 1000 км відносний надлишковий тиск був близьким до 1. Енергія хвилі, проте, може каналюватися в природних атмосферних хвилеводах. При цьому на відстані в 1000 км від гіпоцентру вибуху вказаний параметр може бути помітно більшим.

Таблиця 3.3

**Висотна залежність тиску в ударній хвилі, значення приведеної висоти  $H$  і тиску у незбуреній атмосфері**

$z$ , км	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
$2H$ , км	15	15	15	15	15	15	15	21.7	43.5	87	90
$\Delta p$ , кПа	720	220	18	6.7	2.7	1.1	0.5	0.2	0.012	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$
$p_0$ , кПа	1800	480	130	33.5	8.8	2.3	0.6	0.16	0.016	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p/p_0$	0.40	0.46	0.14	0.20	0.31	0.48	0.83	1.25	7.5	16.9	34.4

Опишемо результати моделювання акустичного ефекту. Рух метеороїда в атмосфері призводить до генерації хвиль густини в широкому діапазоні частот: від акустичних частот  $\sim 1$  кГц до частот порядку  $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$  Гц, які відповідають внутрішнім гравітаційним хвилям. До вибуху метеороїда в енергію акустичних і внутрішніх гравітаційних хвиль перетворюється близько 1 і 5 % кінетичної енергії боліда (див., наприклад, [21, 172]), тобто понад  $1.9 \cdot 10^{13}$  і  $9.4 \cdot 10^{13}$  Дж відповідно.

Під час вибуху метеороїда в енергію ударної хвилі перетворюється близько 30% кінетичної енергії тіла [173], тобто понад  $5.6 \cdot 10^{14}$  Дж. На достатньо великих відстанях від місця вибуху енергія ударної хвилі перетворюється в енергію акустико-гравітаційних хвиль.

Період акустичних хвиль з найбільшою амплітудою пов'язаний з енергією джерела. Виявилося, що він близький до 21 с. Ця оцінка справедлива для приземних вибухів. Під час вибуху на висоті в 25 км період хвиль приблизно

дорівнює 63 с. Приблизно такі періоди (близько 55 с) спостерігалися на інфразвуковій станції в Казахстані [296]. Далі за більших, аж до глобальних відстаней, поширюються хвилі з максимальним періодом близько 4.5 хв [21]. В їх енергію переходить близько 10% енергії вибуху.

Розглянемо іоносферно-магнітосферні ефекти. Ударна хвиля призводить до рухомого фронту підвищеної концентрації електронів  $N$ . Відносне збурення останньої приблизно дорівнює відносному збуренню тиску. Рух ударної хвилі є джерелом рухомих іоносферних збурень в діапазоні акустико-гравітаційних хвиль (див., наприклад, [21, 297]).

Нестационарний плазмовий слід боліда, взаємодіючи з геомагнітним полем, стає джерелом магнітогідродинамічних хвиль, які можуть поширюватися в іоносфері та магнітосфері. В результаті взаємодії цих хвиль з високоенергійними електронами радіаційного поясу Землі можуть виникнути висипання електронів в атмосферу [20, 21].

Проаналізуємо геомагнітний ефект. Геомагнітний ефект метеороїдів вивчений недостатньо. Механізми генерації геомагнітних збурень, перераховані в роботі [298], не можуть вважатися ефективними. Найбільш істотним механізмом є модуляція іоносферних струмів, точніше струмового струменя в динамо-області іоносфери. Остання знаходиться в основному на висотах 100–150 км. Модуляція відбувається за рахунок руху газу у полі акустико-гравітаційної хвилі від вибуху (див., наприклад, [297]). Оцінки показують, що для періоду акустичної хвилі, що дорівнює 60 с, відносної зміни концентрації електронів, яка дорівнює 1, густина іоносферного струму  $10^{-7} - 2 \cdot 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, амплітуда геомагнітних пульсацій близька до 0.5 – 1 нТл.

Опишемо результати моделювання електричного ефекту. Для діапазону висот 25–40 км потенціал електричного поля відносно землі склав 4.5–45 МВ, заряд тіла – 4–40 мК, напруженість електричного поля – 0.5–5 МВ/м відповідно.

Енергія розряду блискавки й акустичного випромінювання не перевищувала одиниць мегаджоулів і сотень джоулів відповідно.

Опишемо коротко сейсмічний ефект. При площі впливу ударної хвилі у  $100 \text{ км}^2$  маємо оцінку енергії ударної хвилі у поверхні Землі  $3 \cdot 10^{14}$  Дж. У енергію сейсмічних хвиль  $E_s$  переходить близько  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  енергії ударної хвилі від приземного вибуху [21]. При цьому енергія сейсмічних хвиль  $3 \cdot 10^9$  –  $3 \cdot 10^{10}$  Дж. Такому значенню енергії відповідає магнітуда землетрусу, близька до 3.1–3.8. Землетрус із такою магнітудою практично не відчувається людиною. Додамо, що сейсмічні вимірювання дали магнітуду, яка дорівнює 3.2–4 [280, 299–301].

Таким чином, Челябінський болід викликав комплекс явищ в атмосфері та магнітосфері, тобто в системі ЗАІМ в цілому [20].

Оцінімо частоту падіння космічних тіл, яка залежить від їхньої енергії (маси і швидкості). При цьому число падаючих тіл протягом 1 року дається відомим співвідношенням (див., наприклад, [21, 302]). Розрахунки по цьому співвідношенню дозволяють стверджувати, що тіла, подібні Челябінському боліду, падають на Землю приблизно кожні 65 років.

### **3.3 Фізичні процеси в атмосфері й іоносфері, які супроводжували падіння Камчатського метеороїду**

Результати цього підрозділу опубліковано в роботі [288].

#### **3.3.1 Загальні відомості про метеороїд**

Близько опівдня за місцевим часом 19 грудня 2018 р. (у 23:48:20 UT 18 грудня 2018 р.) поблизу Камчатського півострова відбулася рідкісна подія – в

атмосферу Землі вторгся і вибухнув великий метеороїд. За розміром і енерговиділенням він поступався лише Тунгуському і Челябінському космічним тілам. За даними сайту NASA [294] сумарна енергія світіння становила 130 ТДж, початкова кінетична енергія  $E_k \approx 173$  кт ТНТ, або 724 ТДж, проекції швидкості  $v_x = 6.3$  км/с,  $v_y = -3$  км/с,  $v_z = -31.2$  км/с, модуль швидкості  $v = 32.0$  км/с, висота максимального світіння – 25.6 км, координати цієї висоти – 56.9°N, 172.4°E. Метеороїд природно назвати Камчатський.

### 3.3.2 Стан космічної погоди

До 16 грудня 2018 р. стан космічної погоди був спокійним. На рис. 3.1. наведені концентрація електронів у сонячному вітрі  $n_{sw}$ , швидкість сонячного вітру  $v_{sw}$ , температура електронів сонячного вітру  $T_{sw}$ , розрахований динамічний тиск сонячного вітру  $p_{sw}$ , компоненти міжпланетного магнітного поля  $B_z$ ,  $B_y$ , розрахована функція Акасофу  $\epsilon_A$ , індекси магнітної активності  $K_p$  і  $D_{st}$  для періоду 15 – 20 грудня 2018 р.

17 грудня 2018 р. концентрація заряджених частинок у сонячному вітрі збільшилась у 3 – 6 разів. Протягом 17 – 20 грудня 2018 р. спостерігалось поступове збільшення швидкості сонячного вітру від 300 – 350 км/с до 600 – 650 км/с. При цьому температура частинок збільшувалась від  $(0.1 - 0.2) \cdot 10^5$  К до  $(2 - 3) \cdot 10^5$  К. Все це супроводжувалось збільшенням динамічного тиску частинок у сонячному вітрі у 5 – 10 разів. Одночасно з цим збільшувався рівень флуктуацій міжпланетного магнітного поля від 2 – 3 нТл до 5 – 7 нТл. Відмічались сплески значень потужності, що поступає у магнітосферу від сонячного вітру, до 8 – 12 ГДж/с. Значення індексів  $K_p$  і  $|D_{st}|$  епізодично збільшувались до 2 – 3 і 10 – 15 нТл відповідно.



Незважаючи на незначні збурення, в цілому стан космічної погоди був сприятливим для спостереження реакції іоносфери на проліт і вибух Камчатського метеороїда.

### 3.3.3 Засоби та методи

Для спостереження за реакцією іоносфери на проліт і вибух Камчатського метеороїда використовувався програмно-апаратний радіотехнічний многотрасовий комплекс похилого зондування іоносфери [303–305]. Аналізу підлягали часові варіації доплерівських спектрів, доплерівське зміщення частоти  $f_D$ , а також відносна амплітуда  $A$  сигналу на кожній радіотрасі.

### 3.3.4 Результати спостережень

Методика виділення можливої реакції іоносфери на проліт і вибух Камчатського метеороїда полягала в наступному. Відмічалися будь-які зміни в поведінці доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналів у порівнянні з їх поведінкою до прольоту метеороїда, а також у порівнянні з їх поведінкою в сусідні контрольні дні 18 та 20 грудня 2018 р.

*Радіотраса Chiba/Nagara – Harbin.* На рис. 3.2 наведена часова залежність доплерівського спектру та відносної амплітуди сигналу на радіотрасі Chiba-Nagara – Harbin 17 – 20 грудня 2018 р. (панелі згори донизу відповідно). Частота радіохвилі 6055 кГц. Товста вертикальна лінія на середній панелі відповідає моменту вибуху метеороїда. Пунктирні лінії відповідають моментам сходу Сонця на висотах 100 і 0 км. Амплітуди сигналу з виходу радіоприймача у децибелах відносно рівня 1 В показані під графіками доплерівського спектру на кожній панелі. Відносна амплітуда сигналу сильно флуктувала. Нове розширення

доплерівських спектрів відмічалось з 00:12 UT до 01:00 UT, з 01:21 UT до 02:13 UT і з 02:53 UT до 03:40 UT 19 грудня 2018 р.

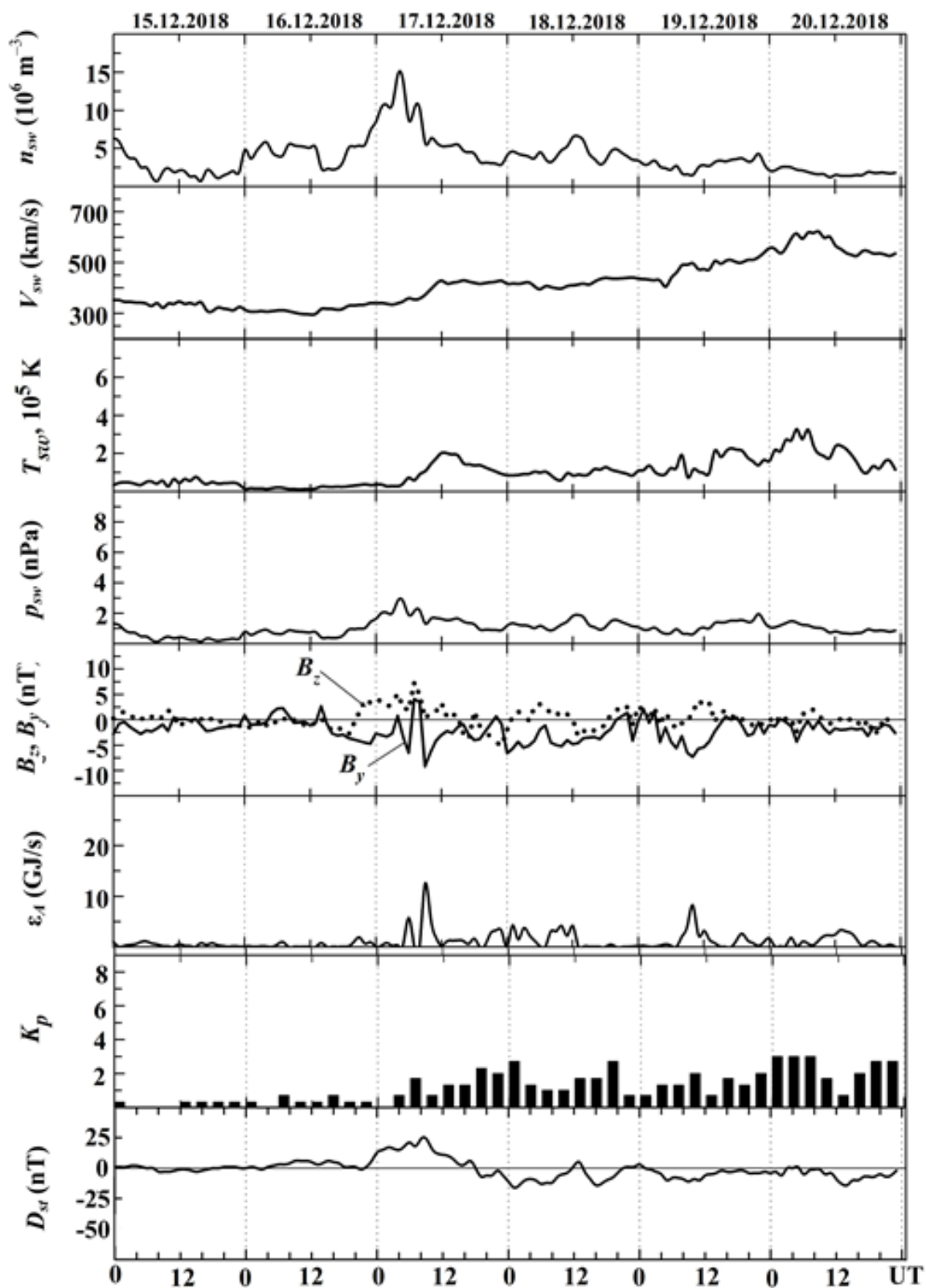


Рис. 3.1 Стан космічної погоди для періоду 15 – 20 грудня 2018 р.

Відносна амплітуда сигналу помітно змінювалася приблизно з 00:00 UT до 00:25 UT і з 01:27 UT до 02:07 UT 19 грудня 2018 р. Крім того, в інтервалі часу 00:12 – 01:00 UT основна мода варіювала за квазіперіодичним законом з амплітудою  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц і квазіперіодом  $T \approx 15$  хв. Приблизно такий же квазіперіод спостерігався і після 01:30 UT, однак  $f_{Da} \approx 0.15$  Гц.

У контрольні дні після 00:00 UT 19 грудня 2018 р. розширення доплерівських спектрів було помітно меншим (не перевищувало 0.5 Гц). Менш чітко виділялись, або були відсутні взагалі, квазіперіодичні коливання. Менше флуктувала й відносна амплітуда сигналу.

*Радіотраса Beijing – Harbin.* В інтервалі часу 23:00 – 24:00 UT 17, 18 і 19 грудня 2018 р. спостерігалось розширення доплерівських спектрів до 1.5 Гц, що свідчить про багатопроменевість (рис. 3.3). Після 00:00 UT 18 і 20 грудня 2018 р. доплерівські спектри стали практично одномодовими, доплерівське зміщення частоти змінювалося за квазіперіодичним законом з  $T \approx 15$  хв й амплітудою  $f_{Da} \approx 0.15 - 0.20$  Гц.

19 грудня 2018 р. зміна характеру поведінки доплерівського зміщення частоти спостерігалася в інтервалі часу 00:27 – 01:30 UT і після 01:36 UT. Значення  $f_{Da} \approx 0.25$  Гц,  $T \approx 10 - 15$  хв.

*Радіотраса Ulaanbaatar – Harbin.* В інтервалі часу 22:00 – 24:00 UT доплерівські спектри були одномодовими 17 і 18 грудня 2018 р., а 19 грудня 2018 р. – спочатку одномодовими, а потім двомодовими (рис. 3.4). Відносна амплітуда сигналу сильно флуктувала.

Після 00:00 UT 18 і 20 грудня 2018 р. доплерівські спектри залишалися практично одномодовими. У той же час доплерівські спектри 19 грудня 2018 р. зазнавали істотного (до 1 Гц) розширення. Зміна характеру поведінки доплерівських спектрів відзначалася в інтервалі часу 00:19 – 03:20 UT 19 грудня 2018 р. Приблизно з 01:05 UT і до 03:20 UT спостерігалися квазіперіодичні коливання відносної амплітуди сигналу, при цьому період був близький до 10 – 20 хв.

*Радіотраса Hohhot – Harbin.* Приблизно з 23:00 UT попередньої доби і до 00:30 UT наступної доби (18, 19 і 20 грудня 2018 р.) доплерівські спектри були

переважно двомодовими, значення доплерівського зміщення частоти варіювалися від 0.2 Гц до 0.8 Гц (рис. 3.5). 19 грудня 2018 р. характер поведінки доплерівських

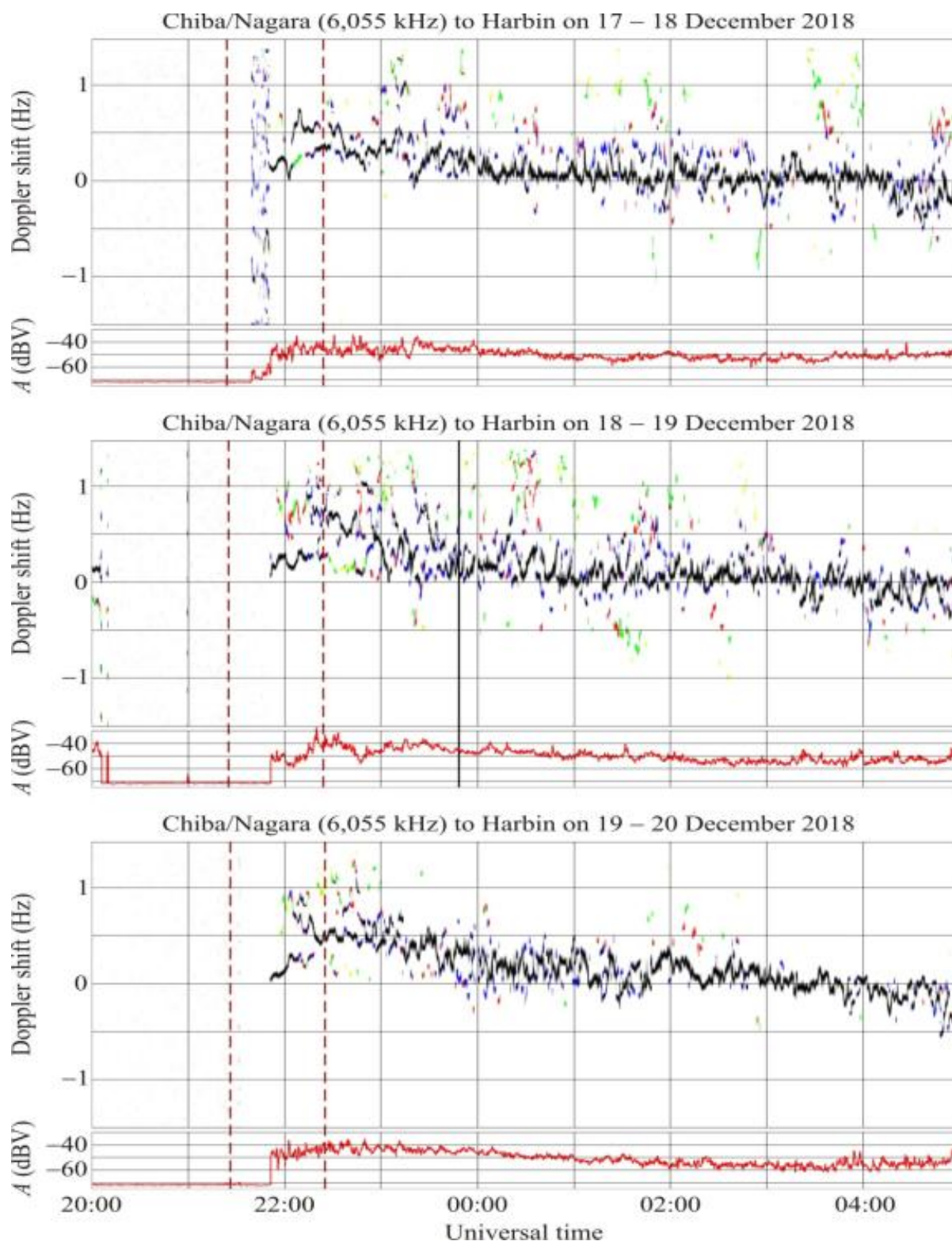


Рис. 3.2 Часова залежність доплерівського спектру та відносної амплітуди сигналу на радіотрасі Chiba-Nagara – Harbin 17 – 20 грудня 2018 р.

спектрів змінювався в інтервалах часу 00:31 – 01:10 UT і 01:32 – 02:10 UT. З 00:48 UT і до 02:15 UT спостерігалися сильні варіації відносних амплітуд сигналу. У контрольні дні варіації були помітно меншими.

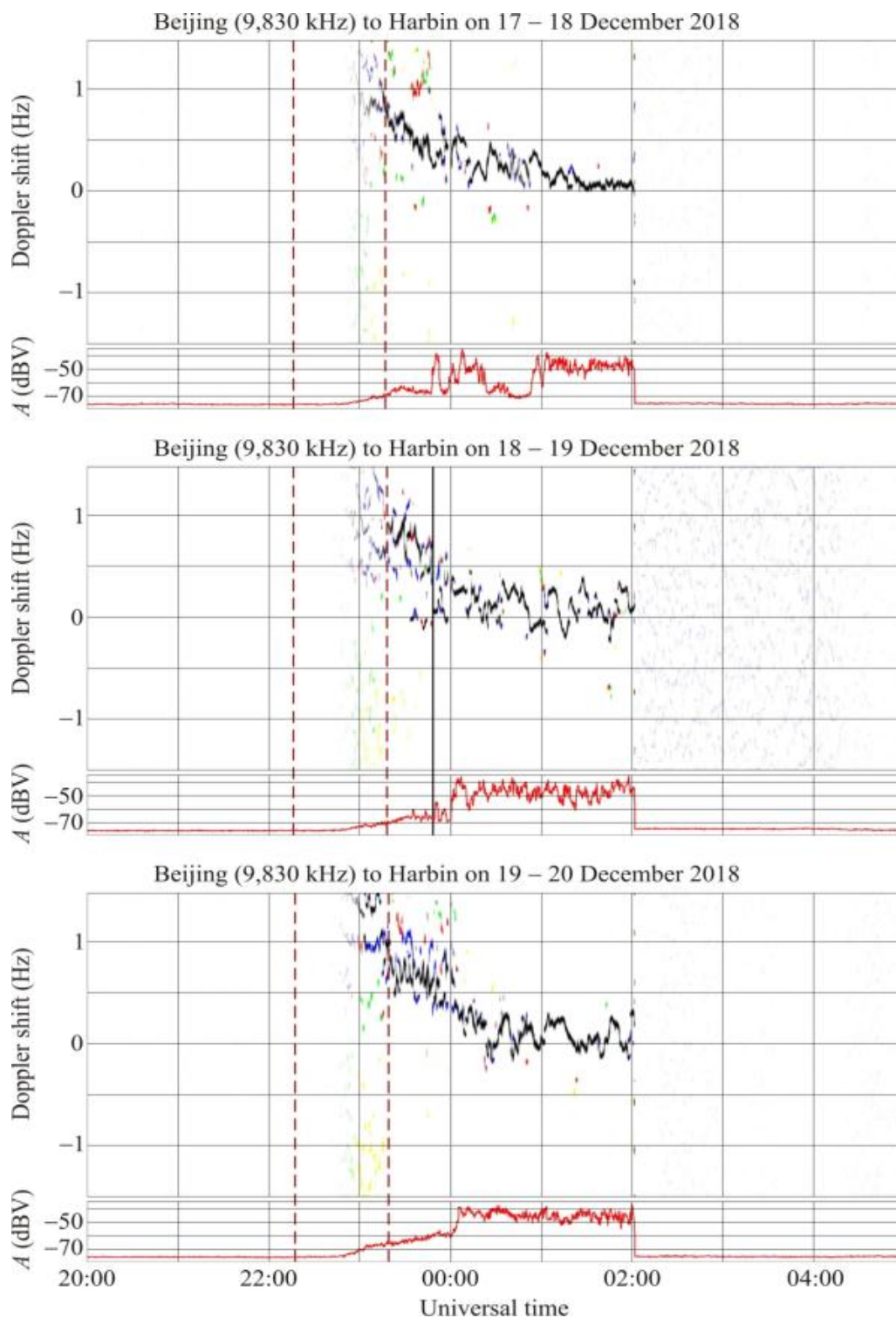


Рис. 3.3 Те ж саме, що і на рис. 3.2, але для радіотраси Beijing – Harbin із частотою  $f = 9830$  кГц

*Радіотраса Shijiazhuang – Harbin.* Приблизно до 24:00 UT 17, 18 і 19 грудня 2018 р. доплерівські спектри були практично одномодовими, значення доплерівського зміщення частоти змінювались від 0.5 – 0.6 Гц (рис. 3.6).

Після 00:00 UT у контрольні дні варіації доплерівського зміщення частоти не перевищували 0.2 – 0.3 Гц, відносно слабо флюктуювали і рівні відносних амплітуд сигналу.

19 грудня 2018 р. характер поведінки доплерівських спектрів суттєво змінився в інтервалах часу 00:22 – 01:06 UT і 01:12 – 01:54 UT. Спостерігався стрибок  $f_D$  від 0.1 Гц до –0.6 Гц. Крім того, в інтервалах часу 01:12 – 01:54 UT і 02:06 – 02:43 UT мали місце значні варіації відносної амплітуди сигналу. Подібні варіації були відсутні у контрольні дні.

*Радіотраса Lintong/Pucheng – Harbin.* З 20:00 UT і до 22:25 UT 17, 18 і 19 грудня 2018 р. доплерівські спектри найчастіше були одномодовими або двомодовими (рис. 3.7). Значення доплерівського зміщення частоти змінювались від –0.2 Гц до 0.5 Гц. Флюктуації відносної амплітуди сигналу були незначними.

В інтервалі часу 22:25 – 24:00 UT спостерігалось значне розширення доплерівських спектрів (від 0 Гц до 1.5 Гц), сигнал був багатомодовим. Помітне розширення доплерівських спектрів відмічалось також с 00:00 UT до 00:40 UT наступної доби.

19 грудня 2018 р. зміна характеру поведінки доплерівських спектрів спостерігалась у 00:28 UT, 02:04 UT і 02:36 UT. Подібні зміни були відсутні у контрольний день 20 грудня 2018 р. Варіації відносної амплітуди сигналу були незначними.

### 3.3.5 Аналіз результатів

Значні варіації доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналу до 24:00 UT 17, 18 і 19 грудня 2018 р. викликані рухом ранкового термінатора через



область відбиття зондуючих радіохвиль. Як правило, реакція на рух термінатора закінчується приблизно через 1 год після сходу Сонця на Землі. Тому можна

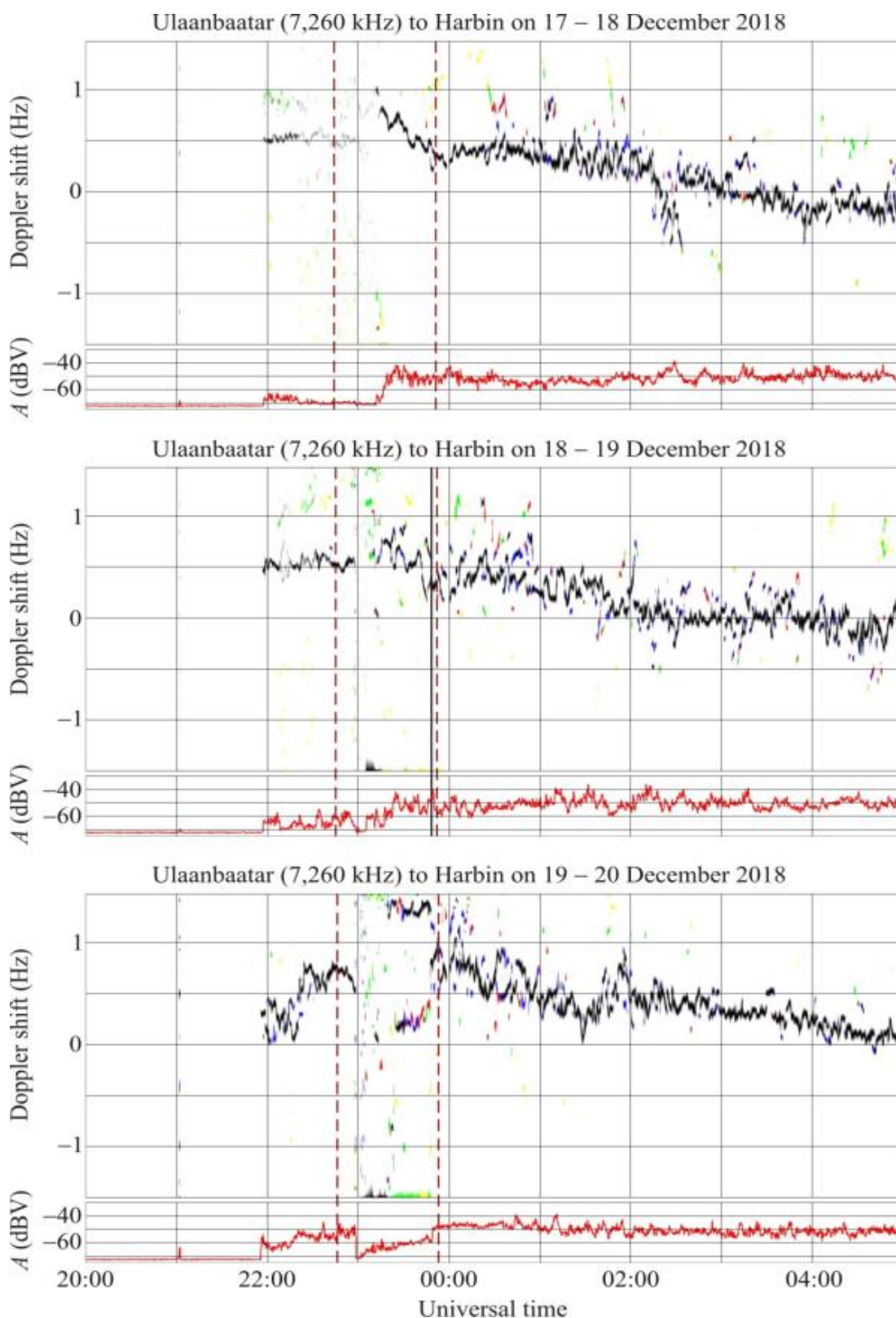


Рис. 3.4 Те ж саме, що і на рис. 3.2, але для радіотраси Ulaanbaatar – Harbin із частотою  $f = 7260$  кГц

сподіватися, що для більшості радіотрас реакція на рух термінатора закінчилася до початку реакції на вибух метеороїда. Винятком можуть стати варіації у

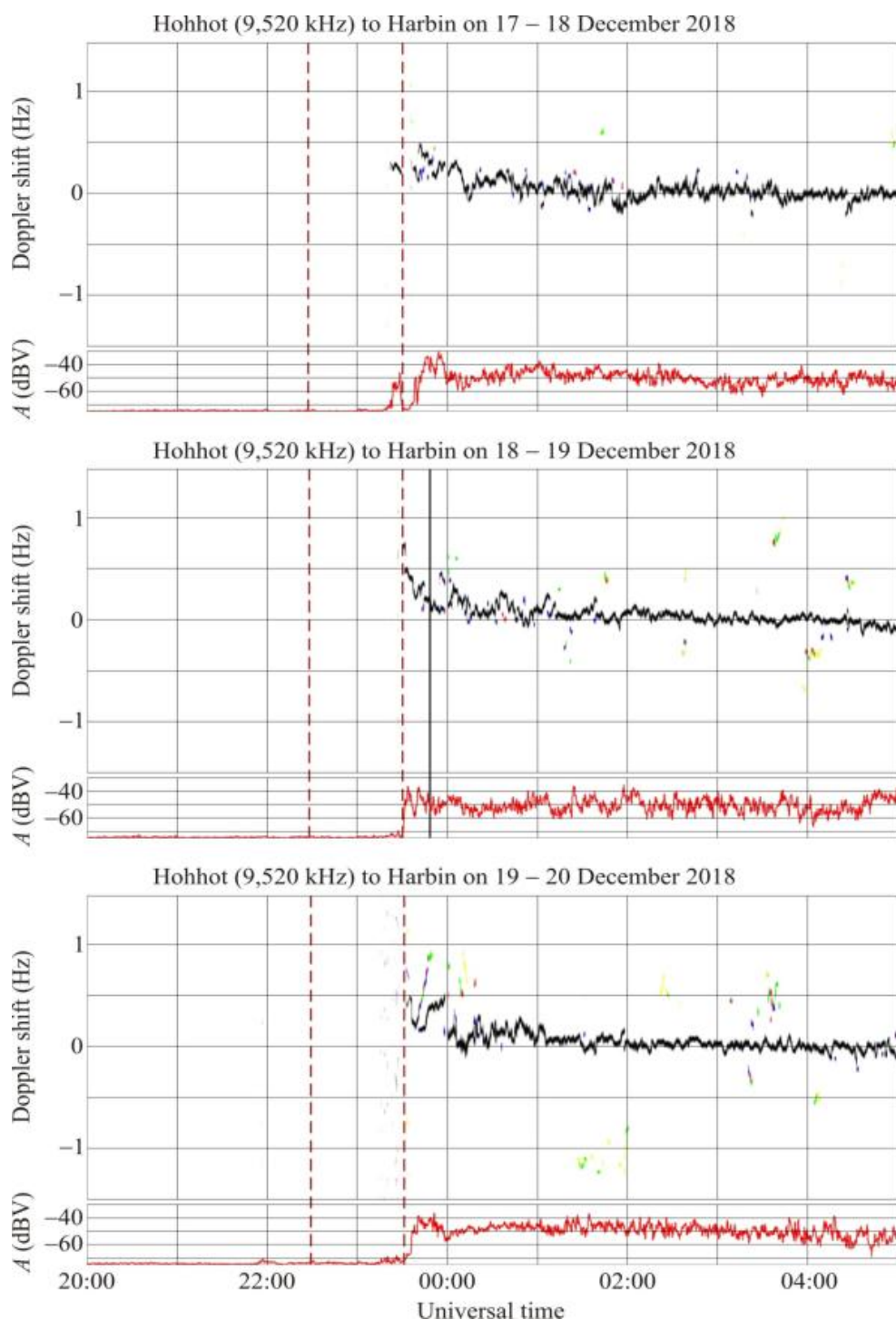


Рис. 3.5 Те ж саме, що і на рис. 3.2, але для радіотраси Hohhot – Harbin із частотою  $f = 9520$  кГц



сигналах, що приходять від самих західних радіостанцій (Ulaanbaatar, Lintong/Pucheng).

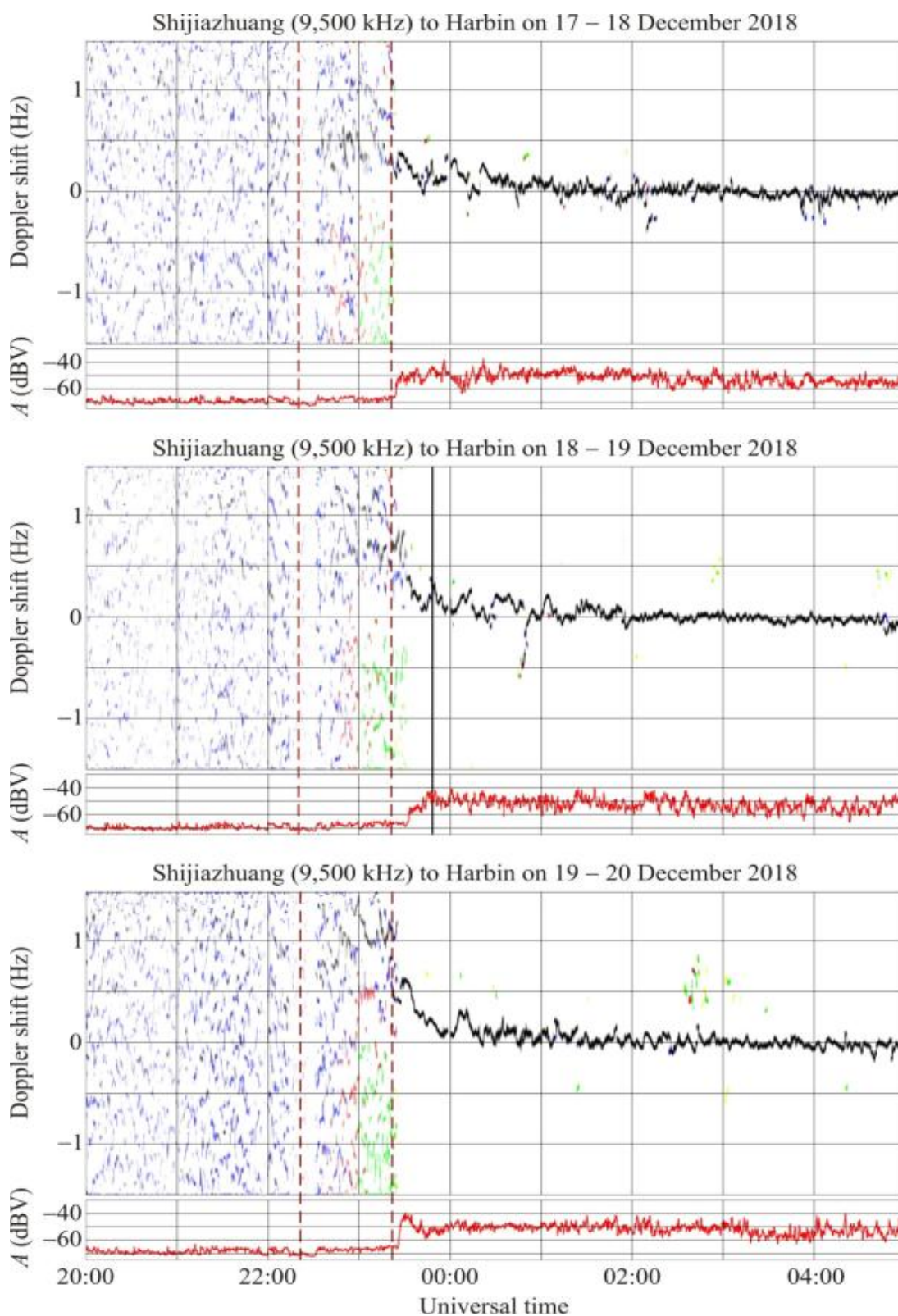


Рис. 3.6 Те ж саме, що і на рис. 3.2, але для радіотраси Shijiazhuang – Harbin із частотою  $f = 9500$  кГц

Припустимо, що після 00:00 UT 19 грудня 2018 р. спостерігаються декілька (до трьох) груп змін характеру поведінки доплерівських спектрів, а також відносної

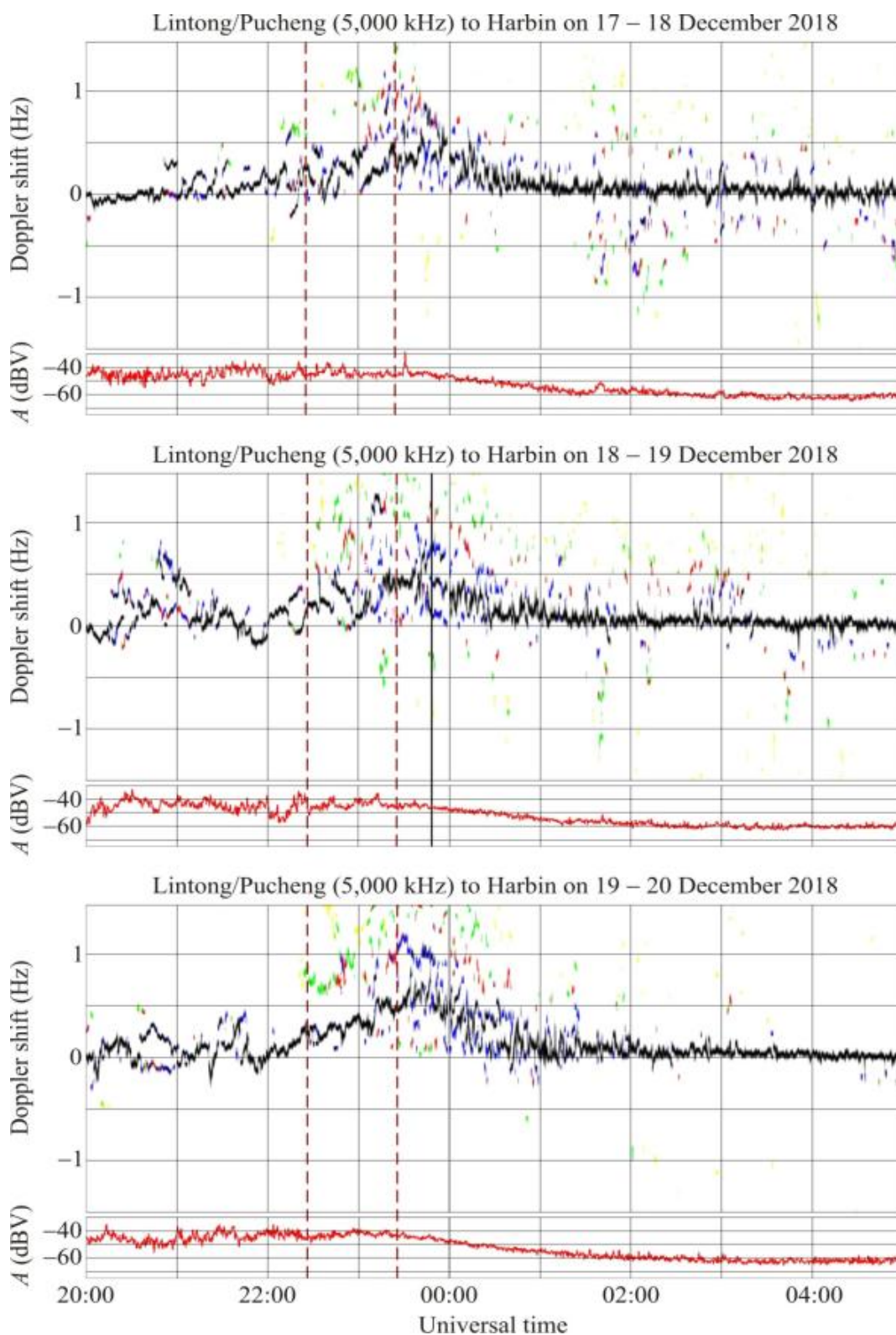


Рис. 3.7 Те ж саме, що і на рис. 3.2, але для радіотраси Lintong/Pucheng – Harbin із частотою  $f = 5000$  кГц

амплітуди сигналу, що викликані вторгненням в атмосферу Землі Камчатського метеороїду. Тоді можна оцінити часи запізнення  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  реакції іоносфери на проліт і вибух метеороїда. Підґрунтям для цього служить той факт, що описані вище збурення відрізнялись від збурень, які мали місце до прольоту метеороїда, а також у контрольні дні.

Знаючи часи запізнення, можна оцінити удавані швидкості поширення збурень по такому співвідношенню:

$$v_i = \frac{R}{\Delta t_i - \Delta t_0},$$

де  $i = 1, 2$  і  $3$ ,  $R$  – відстань від області вибуху метеороїда до середини відповідної радіотраси,  $\Delta t_0$  – час поширення збурення акустичного типу від висоти вибуху до висоти області відбиття радіохвилі на конкретній трасі. Величина  $\Delta t_0$  розраховувалася з залученням траєкторних даних. У якості профілів концентрації електронів використовувалися модельні профілі, що даються моделлю IRI2016.

Зауважимо, що похибка оцінки часу запізнення становить близько 3 хв. Тоді для  $\Delta t_1$  відносна похибка близька до 10%. Такого ж порядку відносна похибка оцінки  $v_1$ . Для  $\Delta t_2$  і  $\Delta t_3$ , а отже і  $v_2$  і  $v_3$ , ця похибка складає 2 – 3 %.

Результати оцінок передбачуваних часів запізнення, а також значень  $\Delta t_0$  і відповідних удаваних швидкостей наведені у табл. 3.4. Із табл. 3.4 випливає, що часи запізнення не завжди збільшувалися при збільшенні відстані від джерела до траси. Це може бути пов'язано з тим, що поширення радіохвиль було не однострибковим, а двострибковим і навіть багастрибковим. При цьому існували дві або кілька областей відбиття радіохвиль, що дають свій внесок у доплерівський ефект. Крім того, необхідно мати на увазі, що швидкість поширення збурень збільшується приблизно вдвічі при збільшенні висоти відбиття від 100 км до 200 – 250 км. Із табл. 3.4 видно, що могли мати місце три групи удаваних швидкостей:  $v_1 \approx 1.9 - 2.9$  км/с,  $v_2 \approx 620 - 770$  м/с і  $v_3 \approx 310 - 500$  м/с.

Не викликає сумнівів, що значення  $v_2$  і  $v_3$  близькі до швидкості атмосферних гравітаційних хвиль (див., наприклад, [130]). Вони мають період від 50 хв. до 180

хв. Такі хвилі спостерігалися іншими дослідниками при прольоті та вибуху Челябінського метеороїда [306, 307].

Таблиця 3.4

**Параметри іоносферних збурень для різних радіотрас**

Радіотраса	$\Delta t_0$ , хв	$\Delta t_1$ , хв	$v_1$ , км/с	$\Delta t_2$ , хв	$v_2$ , м/с	$\Delta t_3$ , хв	$v_3$ , м/с
Chiba/Nagara – Harbin	5	24	2.9	93	630	183	310
Beijing – Harbin	7	39	2.0	108	635	–	–
Ulaanbaatar – Harbin	6	31	2.6	110	620	–	–
Hohhot – Harbin	8	43	1.9	104	690	–	–
Shijiazhuang – Harbin	8	34	2.6	94	770	141	500
Lintong/Pucheng – Harbin	5	40	2.5	136	630	168	430

Різниці у значеннях  $v_2 \approx 620\text{--}770$  м/с пояснюються поширенням атмосферних гравітаційних хвиль різними траєкторіями, впливом метеоумов, вітру, а також горизонтальною неоднорідністю атмосфери [130]. Швидкість  $v_3$  спостерігалась не завжди. Відмінність  $v_3$  від  $v_2$  може бути пов'язана з тим, що ці швидкості відносяться до різних частин одного й того ж хвильового пакету. Не виключено, що вони характеризують хвилі, що прийшли по різних траєкторіях.

Що стосується швидкості  $v_1 \approx 1.9\text{--}2.9$  км/с, то її пояснити складніше. Як відомо, близьку швидкість мають сейсмічні хвилі Релея. Ці хвилі, поширюючись по поверхні Землі зі слабким загасанням, здатні генерувати атмосферні гравітаційні хвилі, які спостерігаються за допомогою ряду методів [130, 306–309]. Енергії Камчатського метеороїда, у принципі, достатньо, щоб згенерувати землетрус із магнітудою 2 – 3. Не можна виключити, що збурення, які мають час

запізнення  $\Delta t_1$ , можуть бути пов'язані з незавершеною реакцією на рух ранкового термінатора.

### **3.4 Динамічні процеси в нижній іоносфері**

Результати цього підрозділу опубліковано в роботах [280–282].

#### **3.4.1 Загальні відомості**

Дослідження динамічних процесів на мезосферних висотах проводиться протягом досить тривалого часу з використанням як наземних, так і супутникових зондуючих установок. В даний час функціонує мережа радарів, які здійснюють безперервний моніторинг мезосфери та нижньої термосфери. Результати проведених досліджень відображені в значній кількості робіт [130, 310–328]. Вивчалися залежності параметрів переважаючих вітрів, планетарних, приливних і акустико-гравітаційних хвиль, турбулентних рухів від часу доби, сезону, географічного положення пункту спостереження, рівня сонячної та магнітної активності та ін. Однак побудова повної картини динамічних процесів ще далека від свого завершення. Це пов'язано з недостатнім розумінням всього самоузгодженого комплексу фізико-хімічних процесів в системах ЗАІМ і СМСМІАЗ, залежністю досліджуваних величин від великої кількості геофізичних параметрів, нерівномірністю розміщення радарів по поверхні Землі, що не дозволяє вивчати динаміку атмосфери в глобальному масштабі, і т. п. У зв'язку з цим дослідження регіональних особливостей динамічних процесів в мезосфері є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить побудувати регіональні динамічні мезосферні моделі, уточнити глобальні моделі загальної циркуляції атмосфери.

Спостереження динамічних процесів проводилися за допомогою єдиного в Центральній Європі радара часткових відбиттів (ЧВ). Радар розташований в

Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (49.5°N, 36.4°E). Опис його технічних характеристик наведений в роботах [280, 329–331]. Тривалі вимірювання огиначаючих звичайної та незвичайної складових ЧВ-сигналів і радіозавад проводилися в різні сезони у 2000 – 2004 рр. Реєстрація їх значень здійснювалася в цифровому вигляді. Інформація зберігалася на магнітному носії. Для визначення параметрів динамічних процесів відбиралися дані, для яких відношення сигнал/завада за потужністю перевищувало 5 дБ, що в основному мало місце в денний час на інтервалі висот 80 – 95 км.

Дослідження параметрів вітру проводилося методом рознесеного прийому з малою базою (110–160 м). Для отримання параметрів неоднорідностей електронної концентрації, вектора спрямованої швидкості вітру, а також статистичних характеристик хаотичної швидкості використовувався модифікований метод повного кореляційного аналізу, описаний в роботах [280, 331, 332]. При цьому інтервал усереднення склав 5 хв. Для подальшого аналізу обчислювалися середньогодинні значення досліджуваних параметрів.

Для визначення переважаючих періодів коливань зональної та меридіональної швидкостей вітру, а також їх амплітуд застосовувалося динамічне перетворення Фур'є на інтервалі  $t_w=120$  хв з кроком  $\Delta t = 30$  хв. З вихідних реєстрацій огиначаючих віднімався тренд, який вираховується методом ковзного середнього на інтервалі  $t_w$  з кроком  $\Delta t_0 = 5$  хв.

Таким чином, ми досліджували параметри хвильових рухів з періодами  $T = 10\text{--}120$  хв, які асоціюються з внутрішніми гравітаційними хвилями. Для виявлення квазігармонічних коливань швидкості застосовувався критерій, описаний в роботі [333] і використаний у роботі [334] при виявленні ХЗ електронної концентрації в мезосфері.

### 3.4.2 Результати спостереження

Опишемо кількісні характеристики спрямованої та хаотичної швидкостей. На рис. 3.8 представлені приклади часових залежностей швидкості вітру  $V$ , його напрямку  $\Phi$  і стандартного відхилення  $\sigma_{vs}$  хаотичної швидкості в мезосфері для різних сезонів. Кут  $\Phi$  відраховувався за годинниковою стрілкою від напрямку на північ. Для побудови плавних кривих використовувалася інтерполяція сплайнами. Видно, що вектор швидкості вітру зазнавав як аперіодичних, так і квазігармонічних варіацій протягом часу спостереження (його величина  $V$  змінювалася в 2 – 5 разів, а напрямок  $\Phi$  – до  $180^\circ$ ). Абсолютне значення вектора швидкості 3 жовтня 2002 р. в ранкові години (06:00–08:00 UT) становило 20 – 30 м/с. Потім воно зменшилося до 5 – 10 м/с у 11:00–13:00 UT, після чого знову збільшилося до 15 – 20 м/с. Швидкість вітру в цей день мала південно-східний напрямок о 06:00–08:00 UT та 13:00–14:00 UT і була спрямована на південний захід в інші години спостереження. Величина  $\sigma_{vs}$ , о 06:00 UT становила 4 – 5 м/с, після чого відбулося її зменшення до 2 – 3 м/с. За час спостереження 9 грудня 2003 р. значення  $V$  зменшилося від 60 до 30 м/с. При цьому напрямок швидкості був південно-східним і змінився незначно – менш ніж на  $20^\circ$ . Значення  $\sigma_{vs}$  у досліджуваний день склало 5–6 м/с. Нарешті, 9 квітня 2002 р. величина швидкості варіювала за квазіперіодичним законом від 15 до 30 м/с. Вектор швидкості при зміні часу від 07:00–12:00 UT змінив напрямок з південно-східного на близький до північного, після чого до 14:00 UT його напрямок повернувся до початкового. Стандартне відхилення хаотичної швидкості склало 3 – 4 м/с.

Розглянемо зональну та меридіональну складові вектора швидкості. На рис. 3.9 наведені приклади часових залежностей середньогодинних значень зональної ( $V_z$ ) і меридіональної ( $V_m$ ) швидкостей вітру для осені, зими і весни,

інтерпольовані сплайнами. Від’ємні значення відповідають напрямку на захід для зональної швидкості та напрямку на південь для меридіональної. Наведені залежності також виявляють значні варіації за час спостереження, особливо у дні, близькі до осіннього і весняного рівнодення. Восени абсолютні значення  $V_z$  і  $V_m$  в основному лежали в межах від 0 до 20 м/с для 3 жовтня 2002 р. і від 0 до 40 м/с для 15 жовтня 2003 р. У зимові дні середні за час спостереження вектора зональної та меридіональної швидкостей були спрямовані на схід і на південь відповідно. Абсолютна величина  $V_z$  для 22 січня 2003 р. не перевищувала 20 м/с, а  $|V_m|$  в цей день змінювався від 20 до 50 м/с. Значення  $|V_z|$  і  $|V_m|$  для 9 грудня 2003 р. варіювали в межах від 0 до 40 м/с і від 0 до 50 м/с відповідно.

В весняний день 9 квітня 2003 р. абсолютні значення  $|V_z|$  і  $|V_m|$  не перевищували 20 м/с, причому обидві складові швидкості змінили знак на протилежний поблизу 08:00 UT. Вектор зональної швидкості 14 квітня 2003 р. більшу частину часу мав західний напрямок, його модуль не перевищував 15 м/с; величина  $V_m$  варіювала від 0 до 45 м/с.

*Спектр коливань складових швидкості вітру.* На рис. 3.10 зображено динамічні спектри величин зональної та меридіональної швидкостей для двох досліджуваних днів.

Як видно, протягом спостережень мали місце коливання з періодами 10 – 120 хв. Їх амплітуда зазвичай не перевищувала 8 м/с і зазнавала помітних часових варіацій. При цьому в окремі моменти часу спостерігався як квазібезперервний, так і близький до лінійчастого спектри. В цілому, виявлена порівняно гарна відповідність спектрів амплітуд обох складових вектора швидкості.



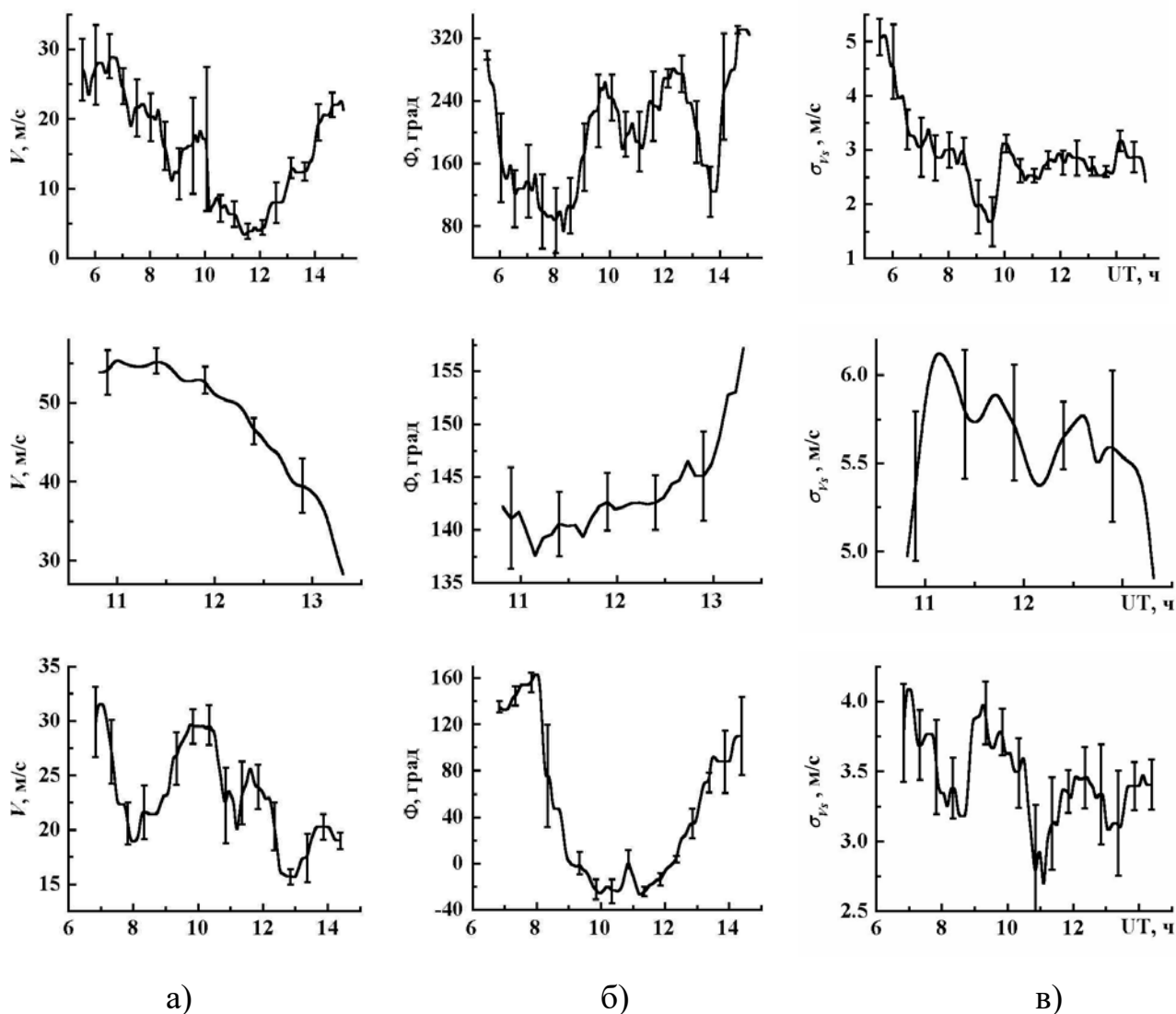


Рис. 3.8 Приклади часових залежностей величини  $V$  (а) і напрямку  $\Phi$  (б) швидкості вітру, а також стандартного відхилення  $\sigma_{Vs}$  (в) хаотичної швидкості в мезосфері для 03.10.2002 р. (верхні панелі), 09.12.2003 р. (середні панелі) і 09.04.2003 р. (нижні панелі). Індекс  $K_p = 3-5$

### 3.4.3 Аналіз результатів експериментів

*Вектор спрямованої швидкості вітру.* Величина і напрямок швидкості вітру в мезосфері під час спостереження визначається великим числом факторів. До теперішнього часу накопичений значний масив

експериментальних даних (квазібезперервні вимірювання протягом декількох десятиліть), що дозволяє встановити залежності переважаючих мезосферних вітрів від рівня сонячної активності [313, 324, 325]. Підтверджено вплив рівня магнітної активності (точніше, сильних магнітних бур) на варіації вектора швидкості [311, 328]. Досить добре вивчені параметри викликаних Сонцем приливних хвиль (особливо добової та напівдобової) [315, 318, 320]. Побудовані теоретичні та емпіричні моделі просторового і часового розподілу їх амплітуд і фаз, а також величини і напрямку переважаючого вітру [315, 326, 327]. Великий внесок у варіації параметрів вітру дають АГХ. Вони справляють помітний вплив на формування характерного для даної місцевості вітрового режиму. Справа в тому, що на мезосферних висотах швидкості атмосферних хвиль порівняні, а часто і перевершують швидкість переважаючого вітру [130, 314].

З проходженням АГХ і приливних гармонік, ймовірно, пов'язані спостережувані в експерименті значні зміни величини і напрямку вектора швидкості вітру, а отже, його зональної та меридіональної складових.

З рис. 3.8 і 3.9 також видно, що найбільш сильні варіації параметри вітру зазнають у дні, близькі до рівнодення. У ці часи року, як відомо, відбувається перебудова єдиної системи мезосферно-термосферних вітрів, що сприяє підсиленню атмосферних хвиль на досліджуваних висотах [130, 314, 321].

В цілому, має місце якісне узгодження отриманих нами результатів з результатами інших досліджень середньоширотної мезосфери північної півкулі різнманітними методами [314, 319, 323]. Для виявлення статистично достовірних особливостей і регіональних сезонних закономірностей наявний масив даних є недостатнім. Планується проведення додаткових безперервних досліджень.

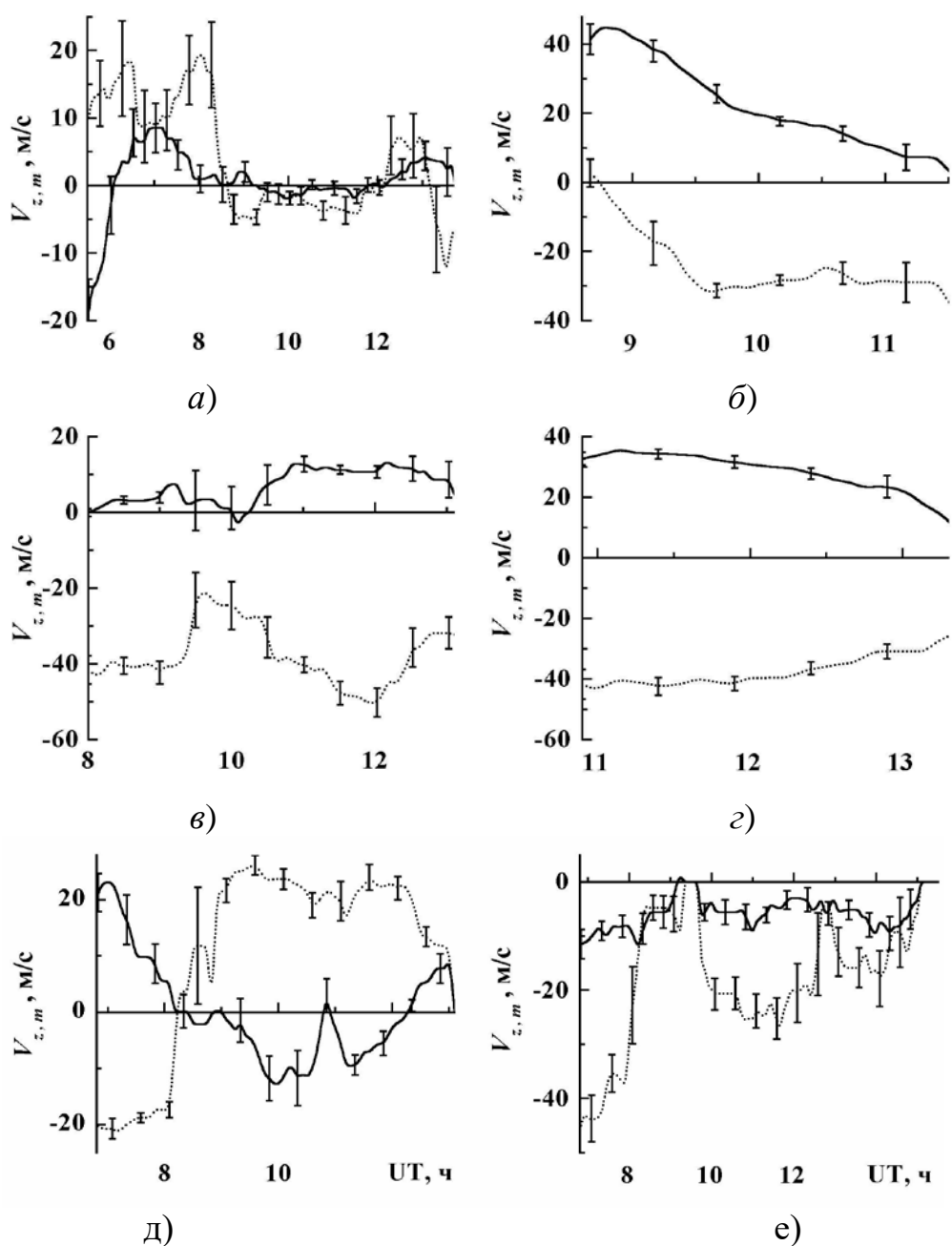


Рис. 3.9 Приклади часових залежностей зональної (безперервна лінія) і меридіональної (пунктирна лінія) швидкостей вітру в осінні (верхні панелі), зимові (середні панелі) і весняні (нижні панелі) дні на висотах 85 – 95 км для 03.10.2002 р. (а), 15.10.2003 р. (б), 22.01.2003 р. (в), 09.12.2003 р. (г), 09.04.2003 р. (д) і 14.04.2003 р. (е). Індекс  $K_p = 2-6$

*Параметри хаотичної (турбулентної) швидкості.* Значення середнього квадратичного відхилення хаотичної швидкості також визначається рядом причин.

Мезосфера є однією з найменш стабільних атмосферних областей, якій притаманні постійні турбулентні рухи [130, 316]. Крім того, підсиленню їх інтенсивності сприяє дисипація планетарних, акустичних і гравітаційних хвиль, що поширюються з нижньої атмосфери. Активізації турбулентної структури також сприяють потужні нестационарні процеси на Сонці і в магнітосфері (спалахи, висипання високоенергійних частинок та ін.). Спостережуване в експерименті збільшення значень  $\sigma_{Vs}$  в ранкові години (06:00–08:00 UT) є достовірним ( $q \geq 10$  дБ) і може бути пов'язано з проходженням сонячного термінатора і викликаними їм нестационарними процесами.

На рис. 3.8 помітна подібність варіацій  $\sigma_{Vs}$  і  $V$ ; коефіцієнт кореляції зазвичай становить 0.5 – 0.8. Це вказує на взаємозв'язок спрямованої та турбулентної швидкостей в мезосфері. Таким чином, отримані результати підтверджують результати роботи [317], де виявлена кореляція параметрів цих швидкостей для коротких і тривалих інтервалів спостереження. В роботі [317] показана можливість дестабілізації мезосфери приливними хвилями через зміну температурного градієнта, формування вітрових зміщень та ін. Так само діють і АГХ, що призводять до значних короточасних варіацій  $\sigma_{Vs}$ . Однак для виявлення всіх механізмів взаємозв'язку спрямованих і турбулентних динамічних процесів необхідне проведення додаткових досліджень.

Слід також зазначити, що значення статистичних характеристик турбулентної швидкості залежать від методу спостереження і обробки експериментальних даних. Експериментально показано, що при використанні методу рознесеного прийому з малою базою і обробці даних методом повного кореляційного аналізу має місце систематичне завищення істинних значень [317, 335]. Справа в тому, що використовувана при цьому методика обробки передбачає безпосередній зв'язок між  $\sigma_{Vs}$  і характерним часом розпливання дифракційної картини  $\tau_c$  [280, 317]. Проте, оскільки горизонтальні розміри розсіюючого об'єму досить великі (вони визначаються шириною ефективної діаграми спрямованості антенної системи,

яка в нашому випадку становить близько  $36^\circ$  по полю [336]), на величину  $\tau_c$  справляють вплив також інші фактори. Основні з них – варіації вектора

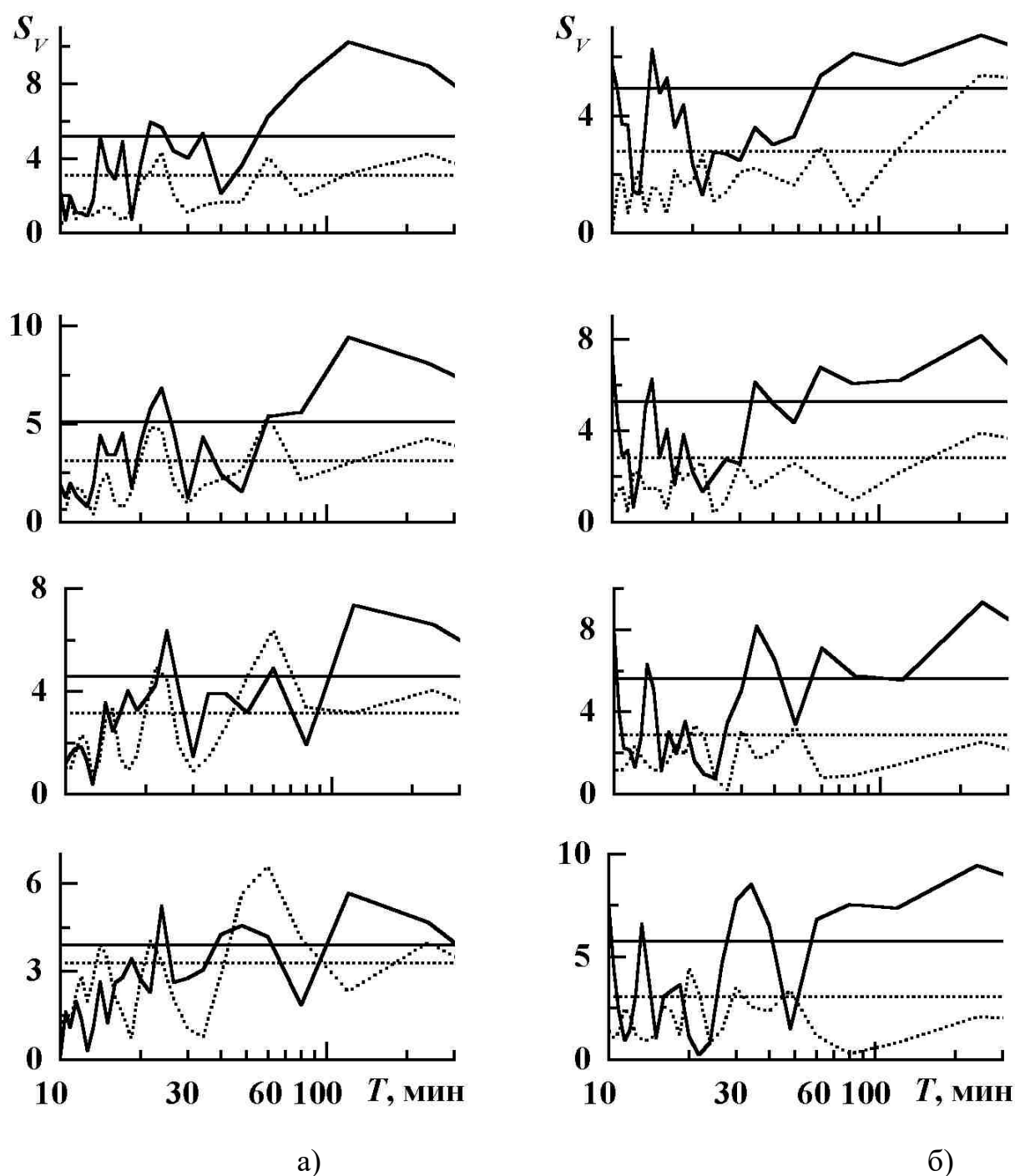


Рис. 3.10 Приклади динамічних спектрів амплітуд зональної (безперервна лінія) і меридіональної (пунктирна лінія) швидкостей вітру для 1.10.2002 р.,  $K_p = 5-7$  (а) і 14.04.2003 р.,  $K_p = 2-5$  (б). Прямими лініями показані довірчі інтервали за рівнем 75% ( $\alpha = 0.25$ )

спрямованої швидкості з висотним масштабом, порівнянним з висотою розсіюючого об'єму  $\Delta h$  (для наших вимірювань  $\Delta h = 3.75$  км); неоднорідності вітрового поля, викликані, зокрема, проходженням АГХ з малими періодами і довжинами хвиль; нестаціонарність розсіяного сигналу, вплив імпульсних завад та ін. Перераховані фактори необхідно враховувати при аналізі характеристик турбулентної швидкості й їх порівнянні з результатами, отриманими іншими методами (доплерівського радіозондування, інтерферометричними та ін.).

*Квазіперіодичні варіації швидкості вітру.* АГХ при своєму поширенні збурюють мезосферу, змінюючи ряд її параметрів, таких як концентрація і температура нейтральних і заряджених частинок, частота зіткнень електронів та іонів з нейтралами, зональна і меридіональна швидкості вітру та ін. При цьому спектр амплітуд цих хвиль зазнавав помітних варіацій в часі (див. рис. 3.10) за рахунок дисипації, нелінійної взаємодії хвиль з різними періодами і відносно короткою тривалістю останніх (два – три періоди). Параметри переважаючих АГХ зазнають також добових та сезонних залежностей, мають регіональні особливості. Крім того, їх оцінки визначаються чутливістю методу спостереження, що впливає на похибки вимірювання вихідних даних. Тому часто досліджуються характеристики спектра потужності АГХ за тривалі проміжки часу (близько місяця) для різних пунктів спостереження [337].

Виявлені внутрішні гравітаційні хвилі (ВГХ) з періодами 10–120 хв можуть мати як локальні, так і глобальні джерела походження [282]. Такі хвилі генеруються в нижній атмосфері атмосферними фронтами, вітровими зсувами, турбулентними рухами, особливостями рельєфу і підстилаючої поверхні та ін. В ранкові та вечірні години ВГХ з періодами 20–60 хв генеруються проходженням сонячного термінатора, що викликає комплекс самоузгоджених процесів в атмосфері. Джерела цих хвиль також можуть бути розташовані в високих широтах (потужні електричні поля, висипання високоенергійних частинок та ін.). У ряді робіт (наприклад [319]) експериментально показана можливість

проникнення ВГХ з термосфери. Однак з теоретичних міркувань амплітуда таких хвиль повинна зменшуватися по близькому до експоненційного закону, тому їх вплив на динаміку мезосфери буде несуттєвим. Слід зазначити, що виявлені нами коливання з періодами 30-120 хв також є основними для великих атмосферних висот (100 – 400 км) [243]. Це може свідчити про єдине джерело їх походження і підтверджує динамічну взаємодію різних областей атмосфери.

### **3.5 Пробій атмосфери наносекундними радіоімпульсами**

Результати цього підрозділу докладно описані в роботі [286].

#### **3.5.1 Загальні відомості**

На параметри атмосферно-іоносферних радіоканалів суттєво впливає штучна іонізація, яка може бути створена у мезосфері за допомогою потужних радіоімпульсів [338]. При цьому може бути створена велика кількість нових радіоканалів.

Перспективним напрямком для створення штучної іонізації є пробій мезосфери наносекундними радіоімпульсами, який призводить до нагріву електронів і лавиноподібного зростання концентрації електронів. Розглянемо це детальніше.

#### **3.5.2 Результати числових розрахунків**

*Нагрів електронів.* Приклад розрахунків  $\theta = T_e/T_{e0}$ , де  $T_e$  – температура електронів (індекс «0» позначає незбурені умови), для імпульсу тривалістю  $\tau = 10^{-9}$  с і ефективної площі антени  $S = 10^4$  м<sup>2</sup> при коефіцієнті корисної дії антени, який дорівнює 0.5, наведений у табл. 3.5. Зрозуміло, що нагрів

електронів більш, ніж у 100 разів неможливий. Починають проявлятися процеси, які не враховані в рівняннях балансу  $T_e$  [289].

*Іонізація атмосфери.* Результати розрахунку критичної швидкості іонізації  $v_c$ , максимальної швидкості іонізації  $v_{i\max}$  та мінімальної тривалості імпульсу пробою  $\tau_{\min}$  при  $N_{\max}/N_0 = 10^{12}$  наведені у табл. 3.6. Пробій

Таблиця 3.5

**Залежність  $\theta$  від висоти та потужності радіоімпульсу ( $\tau = 1$  нс)**

$z$ , км	30	40	50	60	70	80	90	100
$v_0$ , с <sup>-1</sup>	$2 \cdot 10^9$	$4.3 \cdot 10^8$	$9.3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$
$\delta_0 v_0$ , с <sup>-1</sup>	$6 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^2$
$P = 1$ ГВт	12.3	2.3	1.3	1.08	1.02	1	1	1
$P = 10$ ГВт	—	—	8.2	2.1	1.2	1.04	1.01	1
$P = 100$ ГВт	—	—	—	—	4.5	1.5	1.11	1.04

Таблиця 3.6

**Залежність концентрації нейтральних частинок, критичної частоти зіткнень, максимальної швидкості іонізації та мінімальної тривалості радіоімпульсу від висоти пробою атмосфери**

$z$ , км	30	40	50	60	70	80	90	100
$N_n$ , м <sup>-3</sup>	$3.7 \cdot 10^{23}$	$8.2 \cdot 10^{22}$	$2.2 \cdot 10^{22}$	$6.7 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$	$7 \cdot 10^{20}$	$2.2 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{19}$
$v_c$ , с <sup>-1</sup>	$6.3 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$3.7 \cdot 10^9$	$1.1 \cdot 10^9$	$3.4 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^8$	$3.7 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$
$v_{i\max}$ , с <sup>-1</sup>	$6.7 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^9$	$3.6 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$
$\tau_{\min}$ , нс	0.41	1.84	6.9	23	77.8	215	700	2154

атмосфери при  $E \approx E_d$ , де  $E_d$  – поле пробою, потребує довгих імпульсів. Як



виявилось, оптимальна амплітуда напруженості  $E \approx (5 - 8)E_d$  [338], а  $P \approx (25 - 64)P_{\min}$ .

Результати розрахунку поля пробую  $E_d$  і мінімальної імпульсної потужності  $P_{\min}$  наведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

**Залежність амплітуди напруженості електричного поля і мінімальної потужності радіоімпульсу, необхідних для пробую, від висоти і частоти радіоімпульсу**

z, км		30	40	50	60	70	80	90	100
f = 1 ГГц	$E_d$ , кВ/м	38.5	9.3	4.5	4.0	3.8	3.8	3.8	3.8
	$P_{\min}$ , ГВт	31.9	3.3	1.2	1.4	1.69	2.21	2.79	3.45
f = 3 ГГц	$E_d$ , кВ/м	39.3	14.2	11.9	12	11.4	11.4	11.4	11.4
	$P_{\min}$ , ГВт	3.7	0.85	0.94	1.24	1.69	2.21	2.79	3.45
f = 10 ГГц	$E_d$ , кВ/м	47	39.9	39.1	40	38	38	38	38
	$P_{\min}$ , ГВт	0.48	0.58	0.91	1.38	1.69	2.21	2.79	3.45

### Висновки до розділу 3

1. Проліт і вибух Челябінського космічного тіла викликав у всіх геооболонках помітні (або сильні) збурення. За результатами моделювання висота вибуху Челябінського тіла була близька до 25 км.

Надлишок тиску на поверхні Землі поблизу епіцентру вибуху склав одиниці кілопаскалей. Цього виявилось достатньо для того, щоб викликати руйнування елементів конструкцій споруд на площі близько 6 тис. км<sup>2</sup>. Енергія та потужність світлового спалаху склала близько 375 ТДж та 313 ТВт відповідно. Енергія спалаху на 1 – 2 порядки була менше енергії, при якій виникає займання

матеріалів і пожежі. Енергія вибухової хвилі й акустичних коливань була близька до 560 і 19 ТДж. Магнітуда землетрусу, спричинених вибухом Челябінського тіла, не перевищувала 3 – 4.

Відносні збурення тиску повітря та концентрації електронів на іоносферних висотах над епіцентром вибуху досягали сотень процентів. Збурення геомагнітного поля поблизу вибуху Челябінського тіла складало 0.5–1 нТл. Помітні збурення від вибуху поширювалися по горизонталі на відстані в кілька тисяч кілометрів. Космічні тіла, подібні Челябінському астероїду, падають на Землю у середньому з частотою один раз на 65 років.

2. За часовими варіаціями доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналів похилого зондування іоносфери на 6 радіотрасах виявлені іоносферні збурення, що послідували за прольотом і вибухом 18 грудня 2018 р. Камчатського метеороїда з початковою кінетичною енергією 173 кт ТНТ. Збурення мали 2 – 3 групи часів запізнення. Залежно від відстані між місцем вибуху метеороїда й областю середини радіотраси ці часи змінювалися в межах 24 – 43 хв, 93–136 хв і 141 – 183 хв. Їм відповідали удавані швидкості 1.9 – 2.9 км/с, 620 – 770 м/с і 310 – 500 м/с. Збурення, що мали удавані швидкості у сотні метрів за секунду, а також періоди близько 10 – 15 хв, переносяться атмосферними гравітаційними хвилями. Збурення, яким відповідає удавана швидкість 1.9–2.9 км/с, могли бути обумовлені іоносферними процесами, викликаними сейсмічною хвилею від вибуху метеороїда.

3. Вивчено добові та сезонні залежності величини, напрямку, зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості в мезосфері. Показано, що його значення зазвичай становить 10 – 80 м/с при абсолютній похибці 3 – 7 м/с. Виявлені значні варіації модуля швидкості (в 2 – 5 разів) і її напрямку (на 140 – 180°), викликані, ймовірно, проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль і їх гармонік. У дні, близькі до весняного і осіннього рівнодення, виявлено підсилення

цих варіацій, пов'язане з глобальною перебудовою циркуляції атмосфери на мезосферних висотах, що сприяє підсиленню інтенсивності атмосферних хвиль. Досліджені параметри турбулентної швидкості для різних часів спостереження. Показано, що величина її стандартного відхилення на висотах 85 – 95 км лежить в межах 2 – 6 м/с (абсолютна похибка склала 0.3 – 0.8 м/с). Наведені механізми виникнення турбулентної структури в мезосфері. Підтверджений взаємозв'язок характеристик спрямованого та турбулентного руху (коефіцієнт кореляції зазвичай становив 0.5 – 0.8). Описано причини завищення реальних значень стандартного відхилення хаотичної швидкості при їх визначенні методом повного кореляційного аналізу. Виявлено хвильові варіації зональної та меридіональної складових вектора швидкості вітру з періодами 10 – 120 хв. Показано, що амплітуди цих коливань зазвичай не перевищують 8 м/с. Варіації амплітуд коливань викликані дисипацією та нелінійною взаємодією атмосферних хвиль з різноманітними періодами. Проаналізовані можливі джерела генерації хвиль і механізми проникнення останніх на мезосферні висоти. Підтверджений динамічний взаємозв'язок підсистем у системах ЗАІМ і СМСМІАЗ через хвильові процеси.

4. Нагрів електронів надкоротким радіоімпульсом на висотах 30 – 60 км суттєвий вже при  $\tau = 1$  нс та  $P = 1$  ГВт. Пробій атмосфери на висотах 30 – 60 км наступає вже при  $P_{\min} = 0.3\text{--}1.3$  ГВт і  $f \approx 10$  ГГц. При зменшенні частоти до 1 ГГц  $P_{\min}$  збільшується до 1 – 30 ГВт. Для оптимізації процесу пробою атмосфери на висотах 30 – 60 км радіоімпульсами  $P_{\min}$  необхідно збільшити приблизно в 25 – 64 рази.

Результати цього розділу відображені в роботах автора [274, 279–288].

## **РОЗДІЛ 4**

### **ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГЕОКОСМОСІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ВПЛИВ ЗЕМЛЕТРУСІВ**

Цей розділ присвячено дослідженню сейсмо-іоносферних процесів і варіацій характеристик радіохвиль у діапазоні частот 5 – 10 МГц, викликаних землетрусами помірної сили.

Попередні результати дослідження сейсмо-іоносферних ефектів, отриманих у 1970–1990-х роках, опубліковано в роботах [339–344].

#### **4.1 Загальні відомості**

Дослідження останніх десятиліть показують, що земні оболонки – тектоносфера, атмосфера, іоносфера та магнітосфера – не є ізольованими (див., наприклад, [2, 10, 62, 272]). Між ними існують прямі та зворотні, позитивні, що призводять до підсилення певного збурення, та негативні, що призводять до загасання певного збурення, зв'язки. Взаємодія активізується при впливі потужних джерел енерговиділення природного або техногенного походження.

Землетруси являють собою систематично, хоч і випадково, діюче джерело енерговиділення, що призводить до активізації взаємодії підсистем у системі тектоносфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Інтерес до сейсмо-атмосферно-іоносферних ефектів виник у середині 1960-х рр. [45–48]. Було встановлено, що взаємодія підсистем забезпечується за рахунок генерації та поширення сейсмічних, інфразвукових і атмосферних гравітаційних хвиль. Вперше були виявлені іоносферні ефекти землетрусів.

Автори робіт [60, 71, 82–86, 95, 346] теоретично вивчали сейсмо-атмосферно-іоносферні ефекти.

Для експериментального дослідження сейсмо-іоносферних ефектів використовувався цілий арсенал наземних і наземно-космічних методів: вертикального зондування [80], магнітометричний [80], похилого зондування [66,

329, 340, 341], часткових відбиттів [66, 329, 340–344], ДНЧ-зондування [89], GPS-технології [69, 90] та інші.

Дослідження сейсмо-іоносферних збурень триває і в цей час [67, 73–75, 92–100]. Підтверджено, що хвильові збурення в іоносфері генеруються під дією сейсмічних, інфразвукових і атмосферних гравітаційних хвиль, відстежено рух хвильового фронту від епіцентру землетрусу, оцінено збурення повного електронного вмісту концентрації електронів  $N$ , швидкості руху хвиль, їх період. Спостереження виконані для різних землетрусів при різних умовах. Однак залишається невстановленим, як величина та характер сейсмо-іоносферних ефектів залежать від стану атмосферної та космічної погоди, а також магнітуди та глибини епіцентру землетрусу. До теперішнього часу вивчалися сейсмо-іоносферні ефекти для унікальних землетрусів з магнітудою  $M \approx 8 - 9$ . Цікавим є пошук іоносферних ефектів, викликаних помірними землетрусами ( $M \approx 6$ ). Енергія таких сейсмічних подій в тисячі-десятки тисяч разів менше енергії унікальних землетрусів. Належить з'ясувати, на які відстані поширюються сейсмо-іоносферні збурення при помірних землетрусах, які їхні параметри й особливості.

Таким чином, дослідження сейсмо-іоносферних ефектів залишається актуальною задачею.

Метою цього розділу є викладення результатів спостереження динамічних процесів в іоносфері, які супроводжували помірні землетруси в Японії, та їх порівняльного аналізу.

## **4.2 Землетрус 7 липня 2018 р.**

### **4.2.1 Стан космічної погоди**

Землетрус в Японії стався 7 липня 2018 р. в 11:23:50 UTC. Координати епіцентру  $35.107^{\circ}\text{N}$ ,  $140.42^{\circ}\text{E}$ . Глибина – 40 км, епіцентр знаходився під водою. Магнітуда склала 5.9. Пункт спостереження (м. Харбін) розташований на відстані в 1650 км від епіцентру землетрусу.

Для коректної інтерпретації процесів у іоносфері важливий стан космічної погоди (табл. 4.1). Протягом 7 липня 2018 р. стан космічної погоди був сприятливим для спостереження ефектів землетрусу в іоносфері. Зокрема, 6 липня мав місце невеликий спалах на Сонці. Потоки заряджених частинок знаходилися на рівні фону. Значення  $K_p$ -індексу не перевищували 2 (крім початку доби 6 липня, коли  $K_p = 3$ ).

Таблиця 4.1

## Стан космічної погоди за 4–10 липня 2018 р.

Дата, 2018 р.	$W$	$F_{10.7}$	$K_p$		$D_{st}$ , нТл		$A_p$
			max	min	max	min	
4 липня	0	68	1+	1–	14	2	4
5 липня	0	68	5–	0+	15	–23	17
6 липня	0	71	4–	1–	12	–12	7
7 липня	0	72	2	1–	5	–10	5
8 липня	0	72	1+	0+	2	–4	4
9 липня	0	73	1–	0	4	–2	2
10 липня	0	72	2+	0+	20	0	6

## 4.2.2 Результати спостережень

Опишемо часові варіації доплерівських спектрів на радіотрасах різної орієнтації. В якості контрольних обрані спокійні доби 6 і 9 липня 2018 р. В усі дні на всіх радіотрасах спостерігалася багатопроменевість (багатомодовість).

*Траса Chiba/Nagara – Harbin.* Радіостанція, що працює на частоті 6055 кГц, знаходиться в Японії. При цьому  $R \approx 1613$  км, а  $D \approx 880$  км.

Часова залежність доплерівських спектрів для 6, 7 і 9 липня 2018 р. показана на рис. 4.1. У день землетрусу зміна характеру варіацій доплерівських спектрів сталася об 11:35, тобто  $\Delta t_1 \approx 11$  хв з'явилася друга мода зсунута до  $\sim 0.5$  Гц. Квазіперіодичне колювання з  $f_{da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц і  $T \approx 4$  хв спостерігалось в інтервалі часу 12:12 – 13:10, тобто  $\Delta t_2 \approx 48$  хв.

Зміна доплерівських зміщень спектрів з позитивного напрямку на негативний спостерігалася приблизно о 12:15 – 12:20, тобто  $\Delta t_3 \approx 49 - 54$  хв. Тривалість існування негативних значень становила близько 120 хв.

*Траса Yamata – Harbin.* Японська радіостанція випромінює на частоті 9750 кГц. Для неї  $R \approx 1531$  км, а  $D \approx 825$  км.

Часова залежність доплерівських спектрів наведена на рис. 4.2. Перша зміна характеру варіацій доплерівського спектра сталася об 11:35 (тобто  $\Delta t_1 \approx 11$  хв). Зміна зміщень спектрів з області позитивних значень в область негативних значень сталася приблизно о 12:16 ( $\Delta t_3 \approx 50$  хв). Приблизно о 12:10 спостерігалася коливання з  $T \approx 4$  хв і  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. Тривалість існування коливання  $\Delta T \approx 70$  хв. При цьому  $\Delta t_2 \approx 44$  хв.

Поведінки спектрів на обох трасах з Японії (частоти 6055 і 9750 кГц) в цілому подібні.

*Траса Hwaseong – Harbin.* Радіостанція розташована в Кореї. Частота радіохвилі  $f \approx 6015$  кГц, відстань уздовж земної поверхні  $R \approx 950$  км. Відстань від епіцентру до середини траси  $D \approx 1400$  км.

Часова залежність доплерівських спектрів показана на рис. 4.3. Більшу частину часу хвиля відбивалася від шару  $E_s$ . У контрольні дні флуктуації головного максимуму в спектрі не перевищували 0.1 Гц. Ширина спектра досягала 4 – 5 Гц.

У день землетрусу приблизно об 11:38 (час запізнення  $\Delta t_1 \approx 14$  хв) доплерівське зміщення частоти головного максимуму збільшився від 0 до 0.5 Гц. В інтервалі часу 12:20 – 13:00 ( $\Delta t_2 \approx 56$  хв) спостерігалася квазіперіодичне, з періодом  $T \approx 4$  хв, коливання доплерівського зміщення частоти з амплітудою  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. Крім того, його постійна складова збільшилася від 0 до 0.3 Гц.

У день землетрусу невдовзі після події доплерівській спектр розширювався в бік позитивних зміщень до +2 Гц і більше. Це тривало з 12:45 до 13:00. Потім мало місце розширення в бік негативних значень до –2.5 Гц. Якщо це пов'язано з землетрусом, то час запізнення  $\Delta t_3 \approx 80 - 95$  хв. Тривалість цього процесу – 30 – 40 хв.

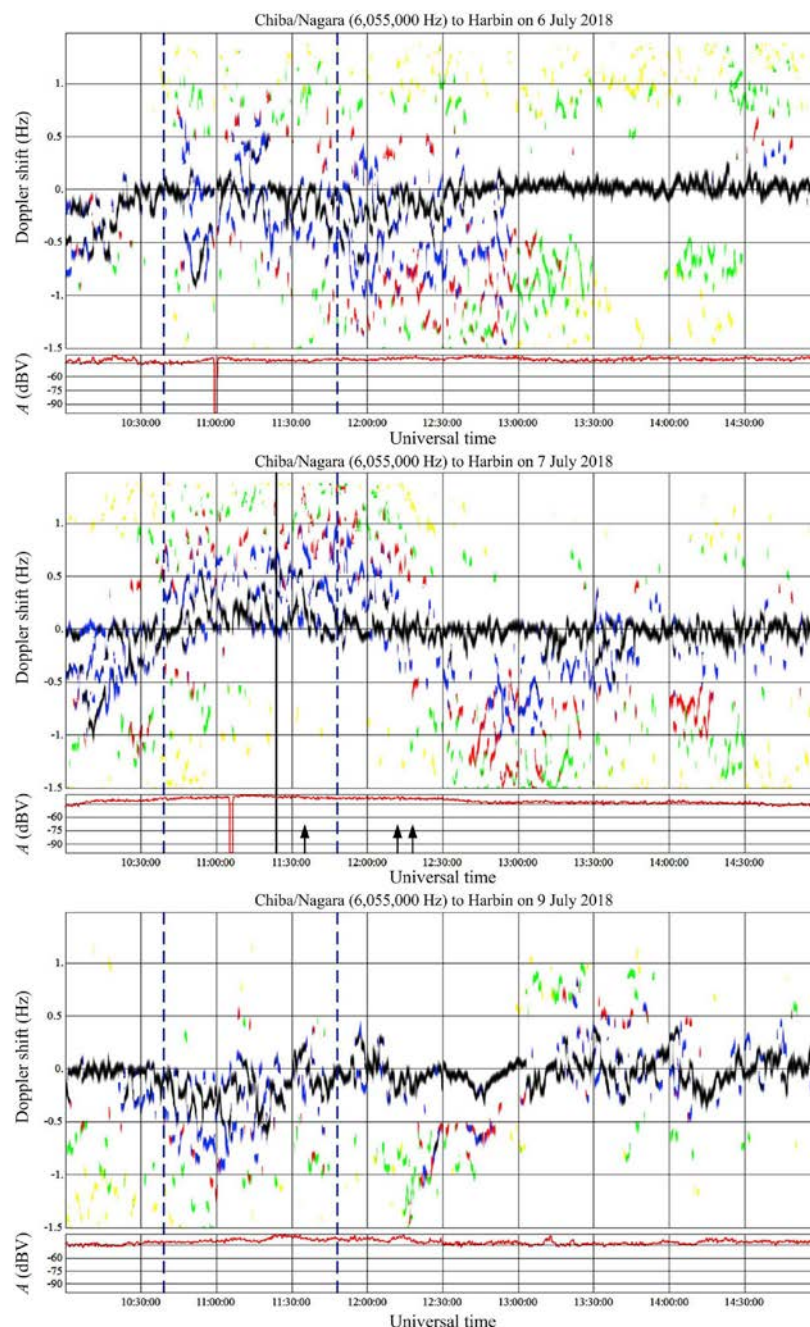


Рис. 4.1 Часові варіації доплерівських спектрів та амплітуди сигналів уздовж радіотраси Chiba/Nagara 6, 7 та 9 липня 2019 р. (панелі зверху донизу відповідно). Частота радіохвилі 6055 кГц. Амплітуда доплерівських ліній показана чорним-синім-червоним-зеленим-жовтим кольорами показані відносні амплітуди 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 відповідно. Кожний інтервал рисунку в 1 год побудовано з 117600 вибірок. Штрихові лінії позначають захід Сонця на висотах 0 і 100 км. Суцільні вертикальні лінії показують початок іоносферної бурі. У кожній панелі під доплерівським спектром показана амплітуда сигналу  $A$  на виході радіоприймача в децибелах відносно 1 В

*Траса Goyang – Harbin.* Корейська радіостанція випромінює на частоті 6600 кГц. При цьому  $R \approx 907$  км, а  $D \approx 1410$  км.



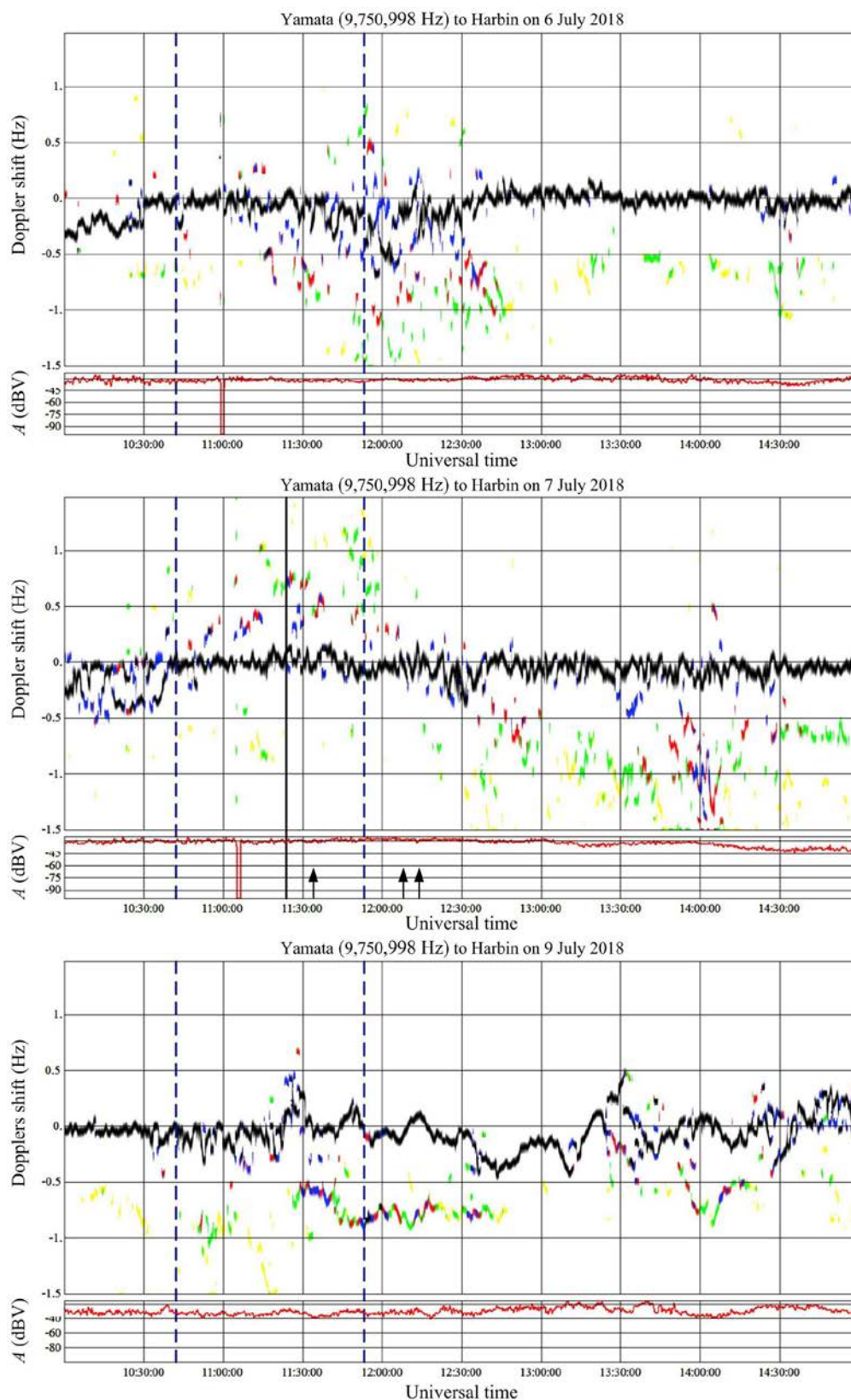


Рис. 4.2 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Yamata–Harbin на 9750 кГц

У день землетрусу доплерівські спектри були більш дифузними, ніж у контрольний день 6 липня 2018 р. (рис. 4.4). 9 липня 2018 р. дифузність була

незначною. У той же час 7 липня 2018 р. вона посилилася практично відразу ж після землетрусу.

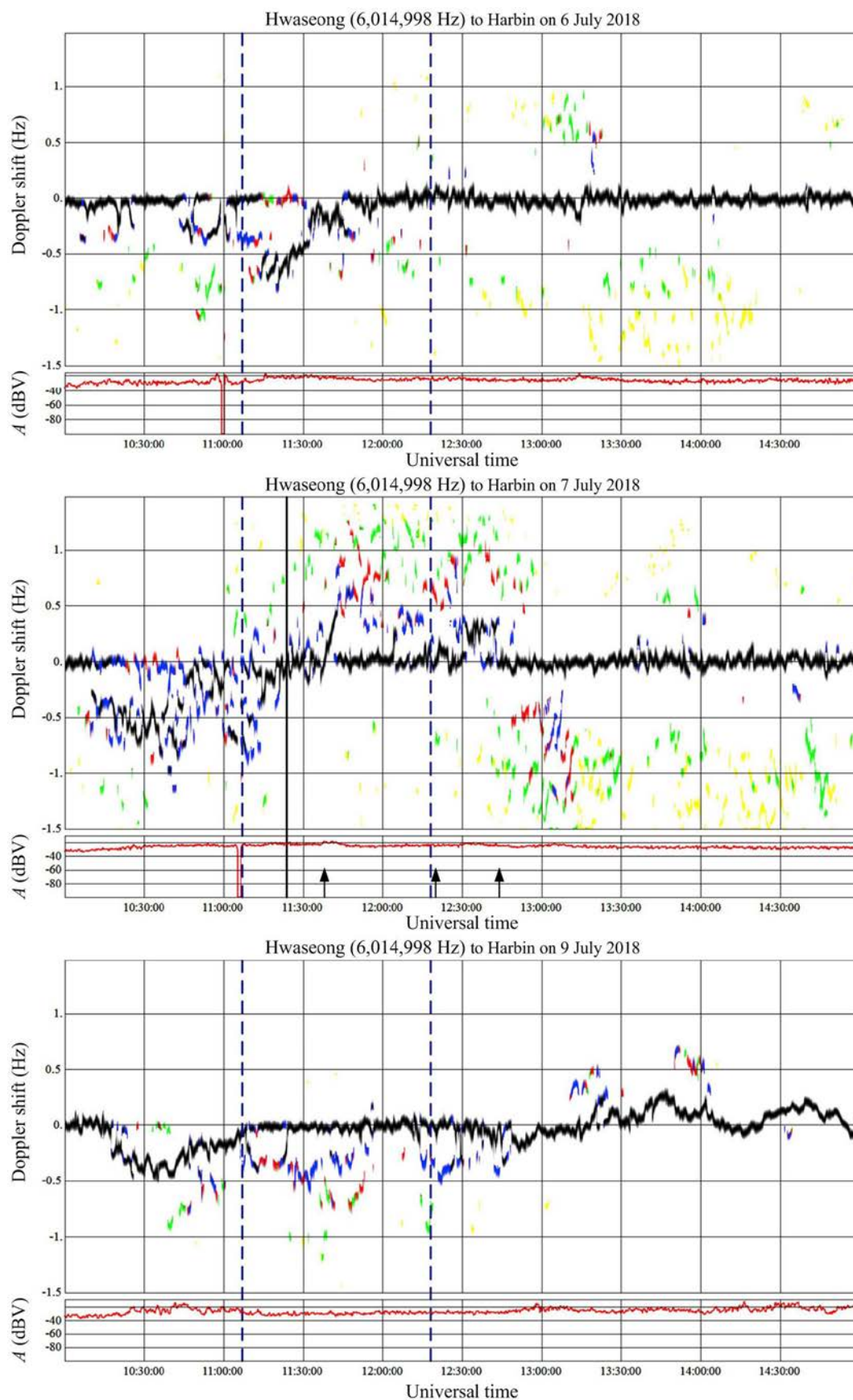


Рис. 4.3 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Hwaseong–Harbin на 6015 кГц

Перші зміни в характері поведінки основного максимуму в доплерівському спектрі сталися приблизно об 11:38 ( $\Delta t_1 \approx 14$  хв). В інтервалі часу 12:21 – 12:47 спостерігалось квазіперіодичне коливання з  $T \approx 4$  хв і  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. При цьому  $\Delta t_2 \approx 57$  хв. Крім того, постійна складова доплерівського зміщення частоти збільшилася від 0 до 0.2 Гц.

В цілому поведінка доплерівських спектрів на трасі Корея – Харбін на частотах 6015 кГц і 6600 кГц була подібною.

*Траса Beijing – Harbin.* Радіостанція, що випромінює на частоті 6175 кГц, знаходиться в Китаї. Для неї  $R \approx 1044$  км, а  $D \approx 1840$  км.

У день землетрусу доплерівські спектри були сильно розмитими (дифузними) (рис. 4.5). Дифузність почалася приблизно об 11:30 і тривала принаймні до 15:00. Ширина дифузної області досягала 4 Гц. У контрольні дні вона не перевищувала 2 – 3 Гц. Квазіперіодичні коливання з  $T \approx 3 - 4$  хв відзначалися в інтервалах часу 11:40 – 12:05 і 12:25 – 13:12. При цьому  $\Delta t_1 \approx 16$  хв,  $\Delta t_2 \approx 61$  хв.

В інтервалі часу 13:20 – 13:50 ( $\Delta t_3 \approx 114$  хв) переважало зміщення спектрів у сторону від’ємних значень.

*Траса Shijiazhuang – Harbin.* Дана радіостанція також розташована в Китаї. Частота радіохвилі 9500 кГц. При цьому  $R \approx 1310$  км, а  $D \approx 1920$  км.

З рис. 4.6 видно, що перша зміна характеру варіацій доплерівських спектрів мала місце об 11:41, тоді  $\Delta t_1 \approx 17$  хв.

В інтервалі часу 12:25 – 13:05 спостерігалися квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти з  $T \approx 3 - 4$  хв і  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. При цьому  $\Delta t_2 \approx 56$  хв.

З 13:10 і до 14:10 значення  $f_d < 0$ . Моменту часу 13:10 відповідає  $\Delta t_3 \approx 106$  хв.

Важливо, що радіохвиля в інтервалі часу 10:00 – 14:10 відбивалася переважно вище шару  $E_s$ . Тому й значення  $f_d$  досягали  $\pm 0.5$  Гц. У перший контрольний день (6 липня 2018 р.) радіохвиля відбивалася від шару  $E_s$ , а в другий контрольний день – вище шару  $E_s$ . Амплітуда  $f_{da}$  у ці дні досягала 0.2 і 0.3 Гц відповідно.

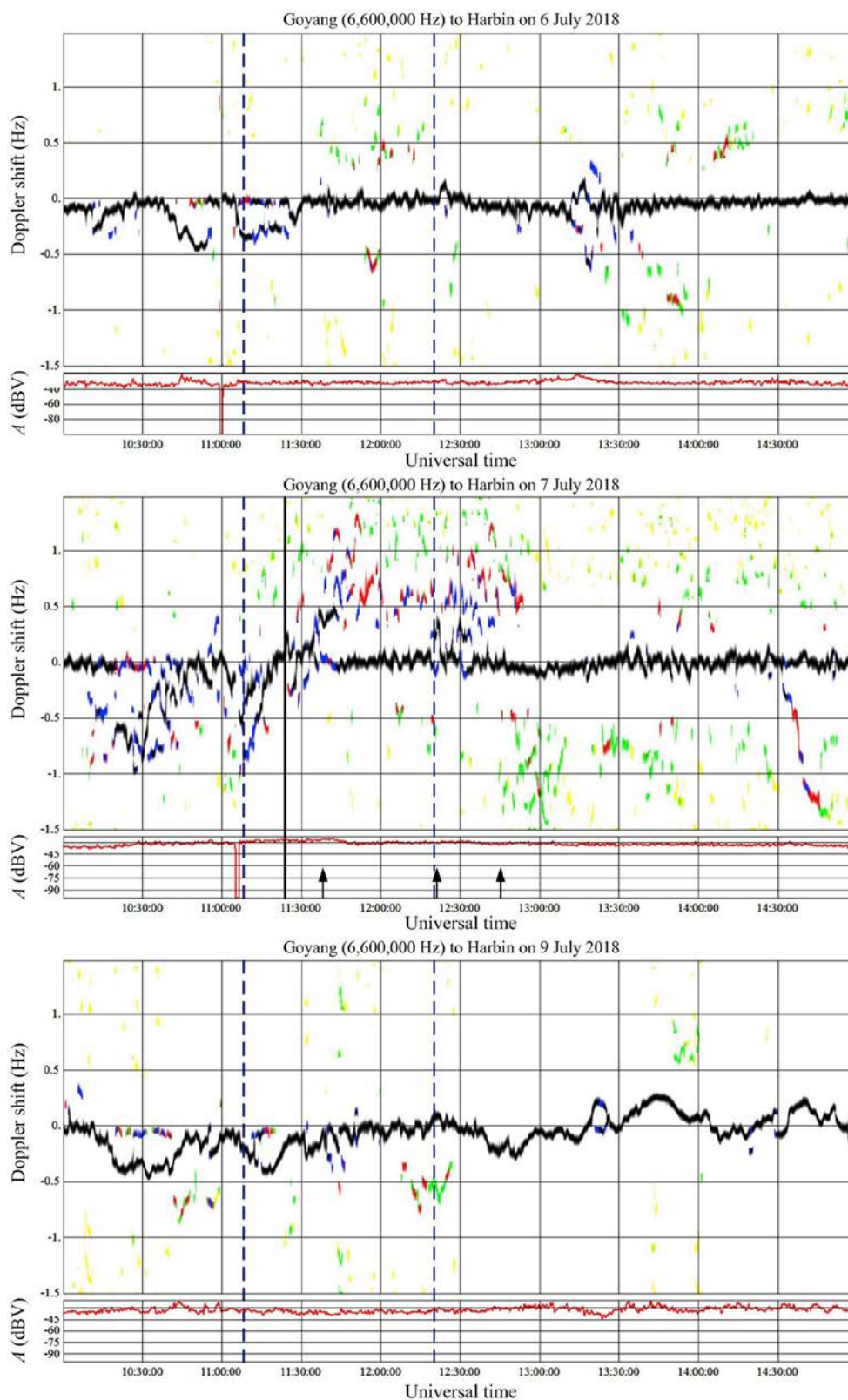


Рис. 4.4 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Goyang–Harbin на 6600 кГц

*Траса Nailar – Harbin.* Радіостанція розташована в Китаї. Частота радіохвилі 6080 кГц. При цьому  $R \approx 646$  км, а  $D \approx 2000$  км.



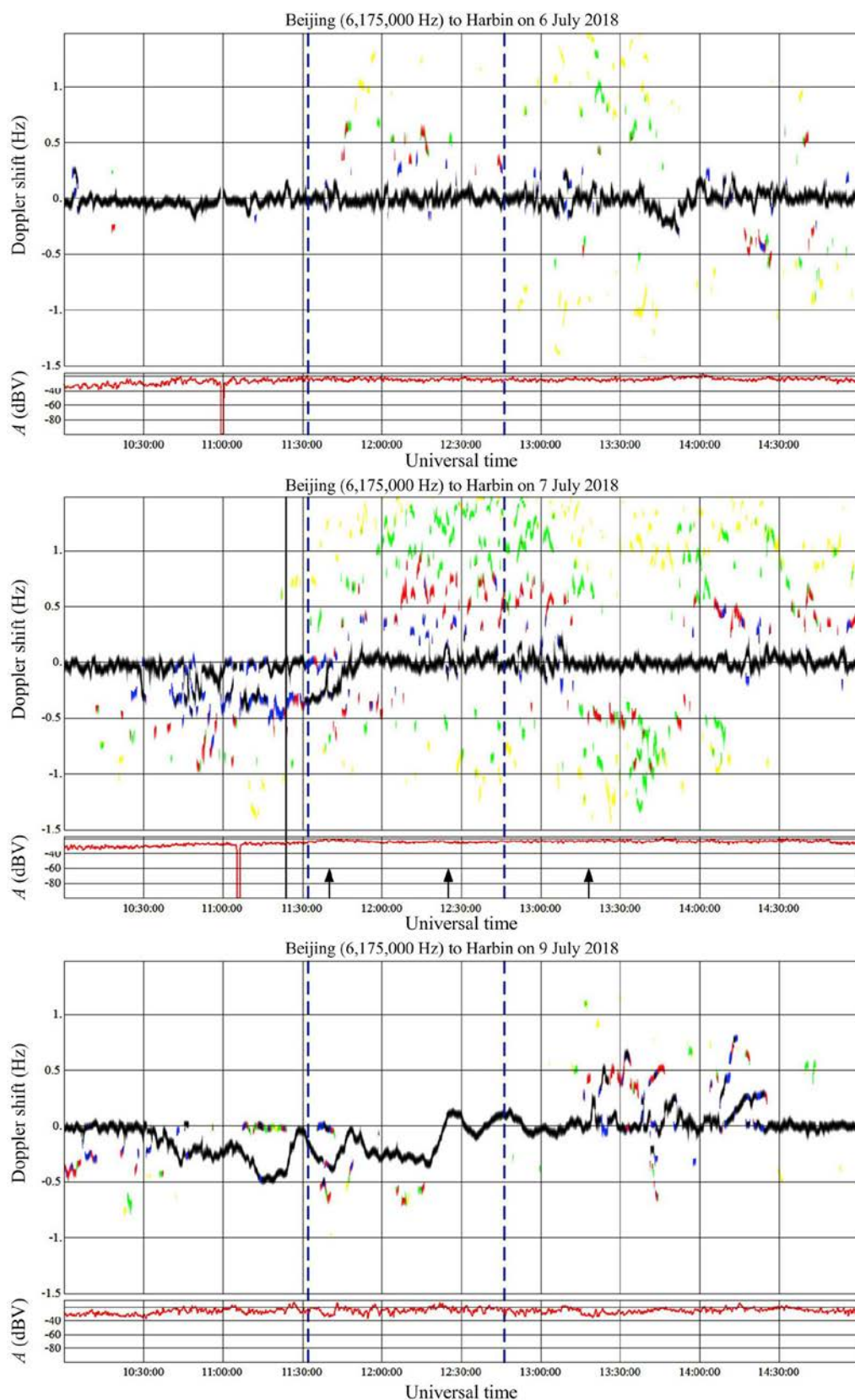


Рис. 4.5 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Beijing–Harbin на 6175 кГц

Часова залежність доплерівських спектрів для 6, 7 і 9 липня 2018 р. показана на рис. 4.7. З рис. 4.7 видно, що в день землетрусу вказана залежність суттєво

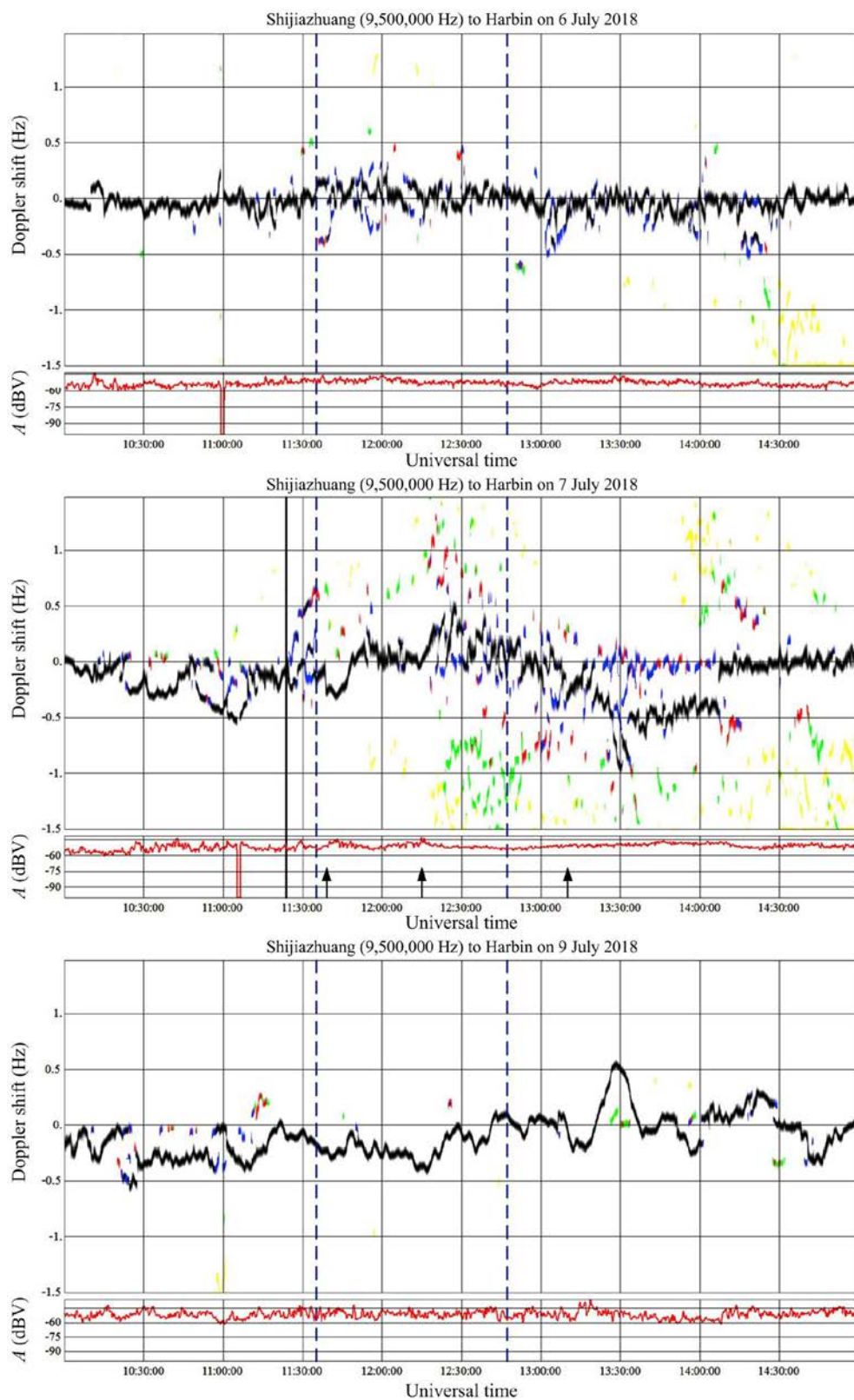


Рис. 4.6 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Shijiazhuang–Harbin на 9500 кГц

відрізняється від залежностей у контрольні дні. По-перше, чітко спостерігається декілька мод з амплітудою, що поступово зменшується. По-друге, у цей день

яскраво виражені квазіперіодичні процеси. Перший квазіперіодичний процес спостерігався в інтервалі часу 11:41 – 13:05. При цьому для основної моди  $f_{da} \approx 0.25 - 0.30$  Гц,  $T \approx 15$  хв,  $\Delta t_1 \approx 17$  хв.

Приблизно о 13:20 розширення доплерівських спектрів у сторону позитивних значень змінилося розширенням у бік негативних значень. При цьому  $\Delta t_2 \approx 114$  хв.

О 13:50 ( $\Delta t_3 \approx 144$  хв) виникло ще одне квазіперіодичне коливання з  $T \approx 20$  хв і  $f_{da} \approx 0.4$  Гц. Після 14:20 спостерігалось зменшення амплітуди та періоду коливань.

*Траса Hohhot – Harbin.* Китайська радіостанція випромінює на частоті 9520 кГц. При цьому  $R \approx 1343$  км, а  $D \approx 2060$  км.

Як видно з рис. 4.8, у день землетрусу доплерівські спектри були сильно дифузними й займали смугу частот приблизно в 3 – 3.5 Гц. У контрольні дні ця смуга становила 1 – 1.5 Гц.

В інтервалі часу 11:50 – 13:20 спектри були зміщені в основному в бік позитивних значень, а з 13:20 і до 14:00 – у бік негативних значень, при цьому  $\Delta t_3 \approx 124$  мин.

Приблизно об 11:41 ( $\Delta t_1 \approx 17$  хв) сталося руйнування квазіперіодичного коливання з  $T \approx 5$  хв і  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. Нове коливання з  $T \approx 12$  хв і  $f_{da} \approx 0.25 - 0.30$  Гц реєструвалося в інтервалі часу 12:30 – 13:10. При цьому  $\Delta t_2 \approx 56$  хв. В інтервалі часу 13:40 – 14:10 мало місце відбиття не від шару  $E_s$ , а від області F. У контрольний день 9 липня 2018 р. після 11:40 відбиття також відбувалося від області F. У цей день, крім коливання з  $T \approx 5$  хв спостерігалися коливання з  $T \approx 30$  хв.

#### 4.2.3 Роль сонячного термінатора

Рух вечірнього сонячного термінатора та генеровані ним збурення можуть накладатися на збурення від землетрусу. Тому потрібен попередній аналіз

можливого впливу збурень, які супроводжують переміщення сонячного термінатора.

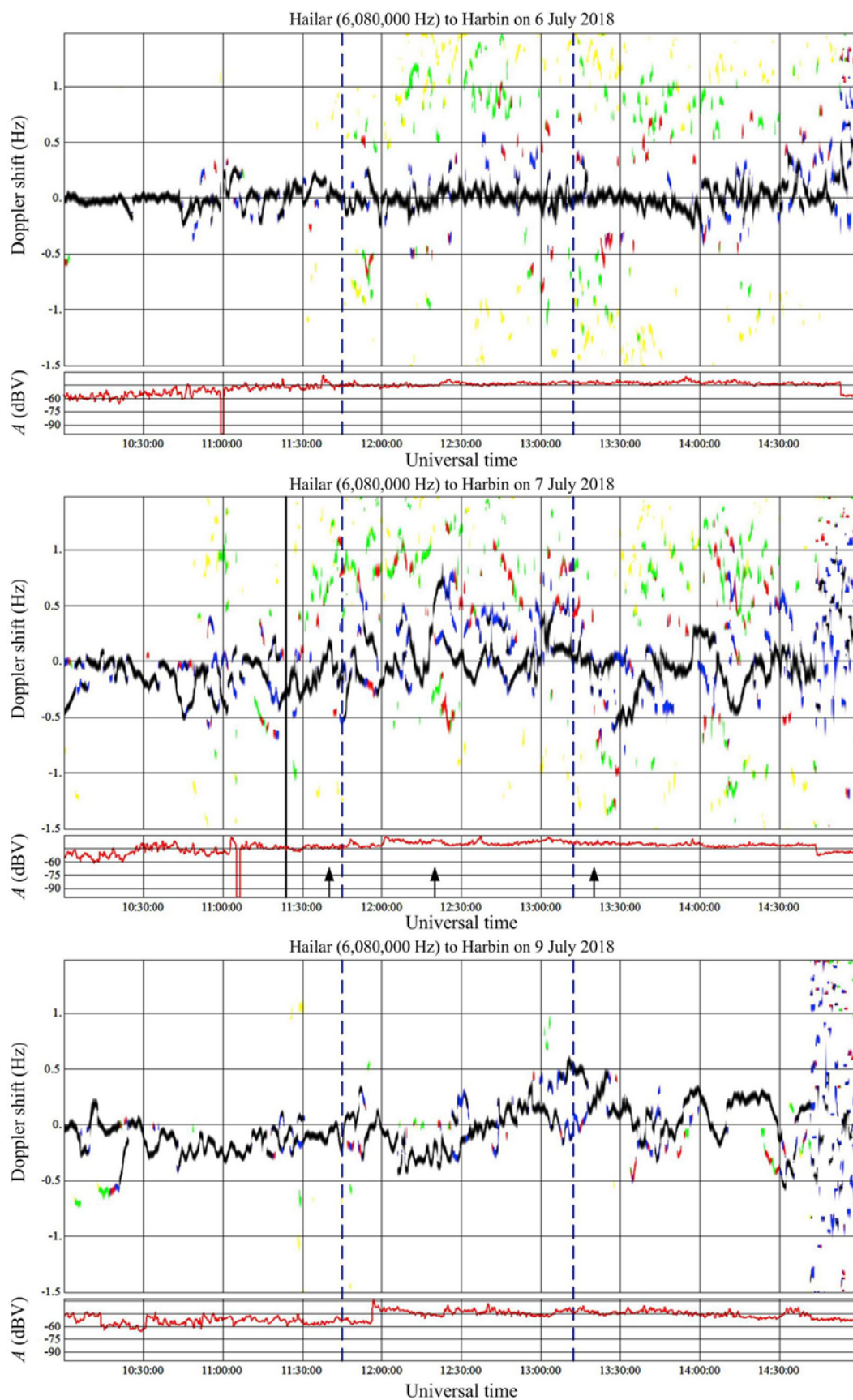


Рис. 4.7 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Hailar–Harbin на 6080 кГц



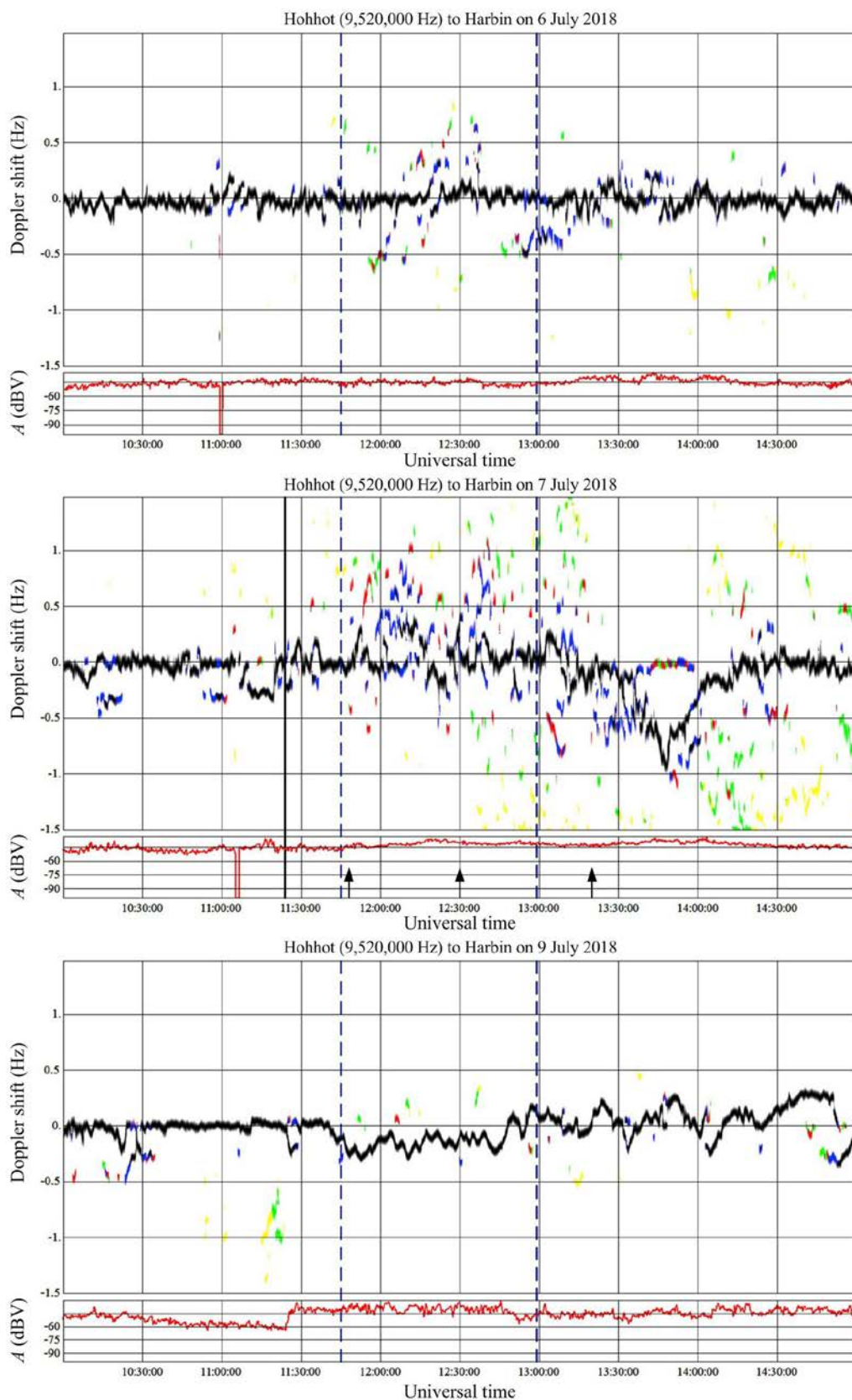


Рис. 4.8 Те саме, що й на рис. 4.1, але для радіотраси Hohhot–Harbin на 9520 кГц

Відомості про часові параметри термінатора на висотах 0, 100, 200 та 300 км наведені на рис. 4.1–4.8. З цих рисунків можна зробити висновок, що при заході

Сонця на висотах близько 100 км (де переважно відбивалися радіохвилі) основні ефекти сонячного термінатора в залежності від траси повинні бути поблизу інтервалу часу 12:00 – 13:00.

В принципі, ефекти сонячного термінатора й землетрусу для ряду трас могли перекриватися за часом. Для селекції можливих ефектів, пов'язаних із землетрусом, використовувалися вимірювання в контрольні дні. Передбачалося, що ефекти термінатора в сусідні дні повинні бути приблизно однаковими. Будь-які відхилення в поведінці доплерівських спектрів у день землетрусу і в контрольні дні підлягали далі більш детальному аналізу на предмет їх зв'язку з землетрусом.

#### 4.2.4 Зв'язок спостережуваних процесів із землетрусом

У день землетрусу загальним ефектом для всіх трас є значне розширення доплерівських спектрів, поява багатомодовості. Багатомодовість виникала або посилювалася через 15 – 20 хв після землетрусу і спостерігалася протягом 2 – 3 годин. Крім того, мало місце зміщення доплерівських спектрів спочатку в бік позитивних значень, а потім – у бік негативних значень. Багатомодовість є результатом підсилення плазмової турбулентності.

Зміщення спектрів були викликані рухом відбиваючого шару вниз, а потім вгору.

Розширення спектру  $\Delta f_d$  пов'язано з характерною швидкістю  $v_t$  турбулентного руху

$$\Delta f_d = 2f \frac{v_t}{c \cos \theta}. \quad (4.1)$$

Наприклад, для траси Beijing – Harbin  $\Delta f_d = +2$  Гц і  $\Delta f_d = -1.5$  Гц,  $\cos \theta \approx 0.2$ . Тоді із (4.1) модуль  $v_t \approx 10$  м/с і  $v_t \approx 7.5$  м/с відповідно.

На користь того, що спостережувані збурення пов'язані з землетрусом, свідчить збільшення часу запізнення при збільшенні відстані  $D$ . Швидкість поширення збурень пов'язана з  $D$  наступним чином:

$$v = \frac{D}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де  $\Delta t_0$  – час вертикального поширення акустико-гравітаційної хвилі від рівня Землі до висоти області відбиття. Результати оцінок  $v$  наведені в табл. 4.2. Вважалося, що  $\Delta t_0 \approx 6$  хв. Тоді для п'яти станцій, для яких впевнено реєструвалося настання першого збурення,  $v_1 \approx 3.00 \pm 0.08$  км/с.

Механізм поширення міг бути наступний. Поверхнева сейсмічна хвиля (хвиля Релея) від землетрусу, поширюючись в усі сторони від епіцентру зі швидкістю близько 3 км/с, викликає генерацію акустичних хвиль, які за час  $\Delta t_0$  доходять до відбиваючого шару, збурюючи його. Збурення концентрації електронів призводять до доплерівського зміщення частоти й розширенню спектрів.

Часу затримки  $\Delta t_2$  відповідає характерна швидкість  $v_2 \approx 0.4\text{--}0.6$  км/с (див. табл. 4.2). Таку швидкість мають акустичні хвилі в атмосфері [345–347]. У цьому випадку збурення концентрації електронів поширюються від епіцентру землетрусу вздовж іоносфери.

Таблиця 4.2

**Залежність параметрів збурень в іоносфері від параметрів радіохвилі та траси**

$D$ , км	880	920	1400	1410	1840	1920	2000	2060
$f$ , кГц	6055	9750	6015	6600	6175	9500	6080	9520
$\Delta t_1$ , хв	11	11	14	14	16	17	17	17
$v_1$ , км/с	2.93	3.07	2.92	2.94	3.07	2.91	3.03	3.12
$\Delta t_2$ , хв	46	44	56	57	61	56	–	–
$v_2$ , км/с	0.37	0.40	0.47	0.46	0.56	0.64	–	–

Продовження таблиці 4.2

$D$ , км	880	920	1400	1410	1840	1920	2000	2060
$\Delta t_3$ , хв	49 – 54	50	80 – 95	–	114	106	114	124
$v_3$ , км/с	0.34 – 0.31	0.33	0.30 – 0.24	–	0.30	0.32	0.30	0.29
$f_{da}$ , Гц	0.20 – 0.25	0.2	0.2	0.2	0.10 – 0.15	0.20	0.25 – 0.30	0.20 – 0.25
$T$ , хв	4	4	4	3 – 4	3 – 4	3 – 4	15	5 12
$\delta_{Na}$ , %	7.2 – 9	4.5	5.6	3.1 – 4.2	1.7 – 3.4	3.5 – 4.7	28.5 – 34.2	5.8 – 7.3 13.9 – 17.6
$\Delta T$ , хв	58	70	30 – 40	26	45	45	84	40

Значенням часу запізнення  $\Delta t_3$  відповідають удавані швидкості близько 0.3 км/с. Певно, перебудова в іоносфері, яка призводить до зміни зміщення доплерівських спектрів з позитивного напрямку на негативний, обумовлена приходом акустико-гравітаційних хвиль від епіцентру землетрусу.

Таким чином, є певні підстави вважати, що землетрус помірної сили ( $M \approx 5.9$ ) призводить до генерації збурень в іоносфері на віддаленнях від епіцентру не менше 1 – 2 тис. км.

#### 4.2.5 Параметри хвильових збурень

Опишемо параметри хвильових збурень, які спостерігалися після землетрусу (див. табл. 4.2). До них відносяться відносна амплітуда збурень концентрації електронів  $\delta_{Na}$ , період коливань  $T_{\text{и}}$  і тривалість цуга коливань  $\Delta T$ . З табл. 4.2 видно, що реєструвалися як інфразвук ( $T \approx 4\text{--}5$  хв), так і атмосферні гравітаційні хвилі ( $T \approx 15\text{--}30$  хв).

Відносна амплітуда  $\delta_{Na}$  коливань, викликаних інфразвуковими хвилями, становила 4.5–9 %. Тривалість цуга коливань перебувала в межах 24 – 55 хв.

Відносна амплітуда  $\delta_{Na}$  коливань, обумовлених атмосферними гравітаційними хвилями, була помітно більше – 30–55 %. Особливо значною була відносна амплітуда для трас Nailar – Harbin та Hohhot – Harbin. Тривалість цуга коливань була близько 100 хв (див. табл. 4.2).

### 4.3 Землетрус 5 вересня 2018 р.

#### 4.3.1 Стан космічної погоди

Для виділення ефектів землетрусу необхідний ретельний аналіз стану космічної погоди.

У ніч з 3 на 4 і з 6 на 7 вересня 2018 р. концентрація  $n_{sw}$  частинок у сонячному вітрі збільшувалася від  $5 \cdot 10^6$  до  $25 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  (рис. 4.9). 5 і 7 вересня 2018 р. спостерігалось збільшення швидкості  $V_{sw}$  частинок від  $\sim 400$  до  $\sim 490 \text{ км/с}$ . Зростання температури частинок мало місце 5 і 7 вересня 2018 р. від  $0.5 \cdot 10^5$  до  $2.6 \cdot 10^5 \text{ К}$ . Збільшення  $n_{sw}$  і  $V_{sw}$  призвело до збільшення динамічного тиску від 1.5 – 2.5 до 6.6 нПа.

Азимутальна  $B_y$  і вертикальна  $B_z$  компоненти міжпланетного магнітного поля флуктували в межах від  $-6.9$  до  $5.9 \text{ нТл}$  і від  $-4.4$  до  $9.4 \text{ нТл}$  відповідно. 4, 5 та 7 вересня 2018 р. мали місце сплески значень функції Акасофу (потужності, що надходить в магнітосферу від сонячного вітру), що досягають 4.5 – 5.7 ГДж/с. Як результат, 4, 5 та 7 вересня 2018 р. спостерігалися відносно невеликі магнітні збурення. Індекс  $K_p$  змінювався від 2 до 3.3, а  $D_{st}$ -індекс варіювався від  $-23$  до 21 нТл.

Наведемо, як приклад, результати спостережень за часовими варіаціями доплерівських спектрів для двох радіотрас, найближче розташованих по відношенню до епіцентру землетрусу (рис. 4.10, 4.11).

### 4.3.2 Результати спостережень

*Радіотраса Hwaseong – Harbin.* Радіопередавальний пристрій, що випромінює на частоті 6015 кГц, дислоковано в Південній Кореї. При цьому довжина радіотраси вздовж земної поверхні  $R \approx 949$  км, відстань від епіцентру до середини радіотраси  $D \approx 1279$  км.

Часові залежності доплерівських спектрів (доплерограм) для 4, 5 та 6 вересня 2018 р. наведені на рис. 4.10. Доби 4 і 6 вересня 2018 р. використовувалися в якості контрольних.

У контрольні дні з 17:00 до 19:30 доплерівське зміщення частоти  $f_D(t) \approx 0$  Гц. 4 вересня 2018 р. епізодично з'являлася й друга, більш слабка, мода. У контрольні дні після сходу Сонця на висотах іоносфери  $f_D(t)$  різко збільшився до 0.7 – 0.8 Гц, а потім поступово, флюктууючи, убував до 0 Гц.

У день землетрусу поведінка  $f_D(t)$  була іншою. До 17:50  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Крім того, в інтервалі часу 17:20 – 18:00 спостерігалася друга, більш слабка, мода. О 17:50  $f_D(t)$  основної моди різко збільшився від 0 до 0.20 – 0.25 Гц. Далі намітилася тенденція до її зменшення. Перша зміна характеру варіацій  $f_D(t)$  мала місце близько 18:20, друга – близько 18:56. Далі спостерігалися квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з періодом  $T$  близько 30 хв, амплітудою  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц і тривалістю близько 150 хв. Крім того, відзначалися слабкі (з  $f_{Da} \approx 0.05 - 0.10$  Гц) квазіперіодичні варіації з  $T \approx 3$  хв.

У день землетрусу з 18:30 до 19:30 мали місце значні (до 30 дБВ) варіації амплітуди сигналу, які відсутні в контрольні дні.

*Радіотраса Goyang – Harbin.* Радіостанція, що випромінює на частоті 6600 кГц, розташована також у Південній Кореї. При цьому  $R \approx 907$  км, а  $D \approx 1272$  км.

Часові залежності доплерівських спектрів для контрольних днів і дня з землетрусом показані на рис. 4.11. З рис. 4.11 видно, що в контрольні дні до 20:30 – 21:00  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Після вказаного часу спостерігалися значні варіації доплерограм.

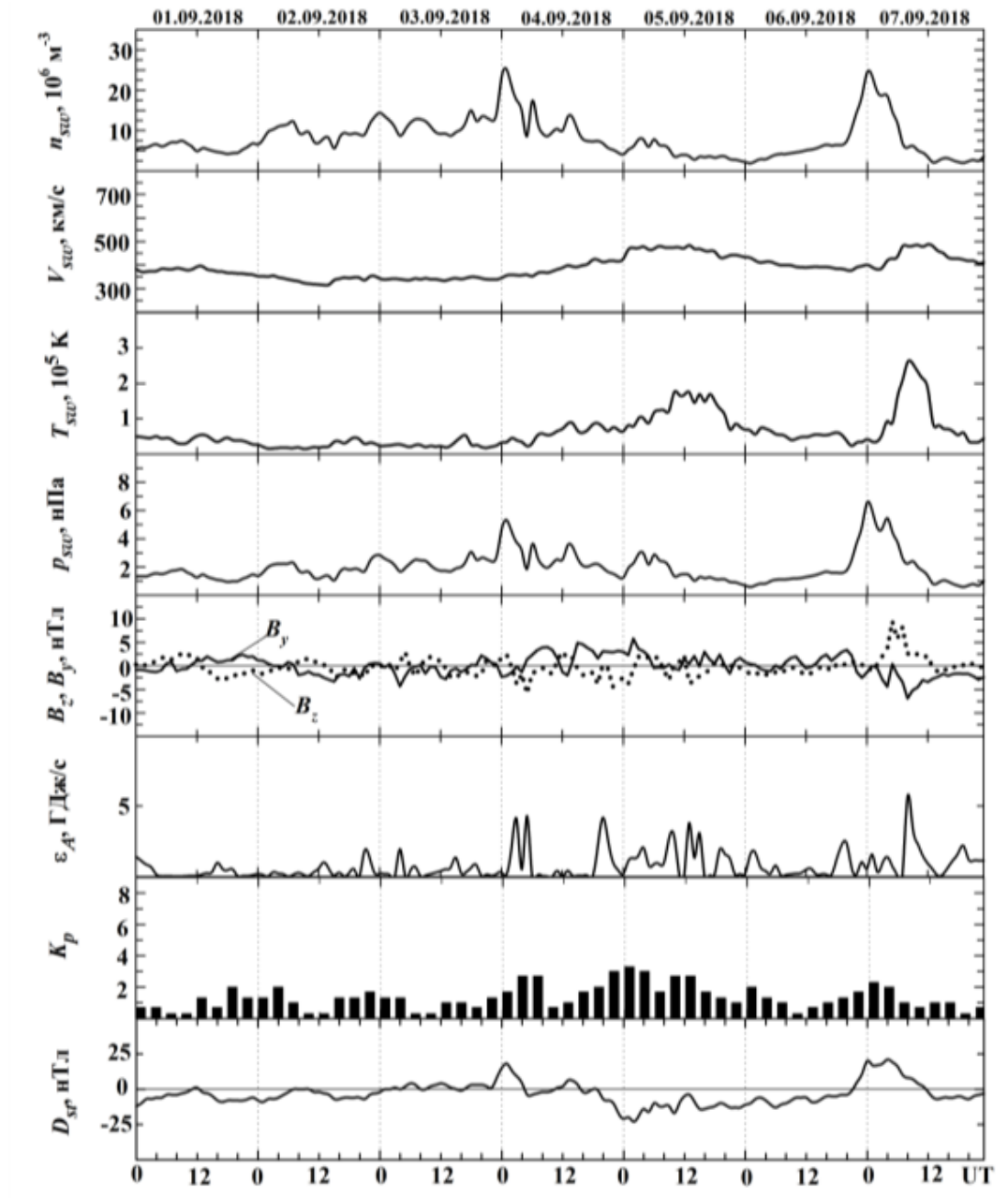


Рис. 4.9 Стан геокосмічної погоди 3–13 листопада 2004 р. (наявне на <http://www.sec.noaa.gov/weekly>). Концентрація протонів у сонячному вітрі  $n_{sw}$ , швидкість сонячного вітру  $V_{sw}$ , температура іонів у сонячному вітрі  $T_{sw}$ , розрахований динамічний тиск сонячного вітру  $p_{sw}$ , компоненти  $B_z$ ,  $B_y$  міжпланетного магнітного поля, розрахований параметр Акасофу  $\epsilon_A$ , індекси магнітної активності  $K_p$  і  $D_{st}$  11–17 травня 2019 р. Дані зі штучних супутників ACE і GOES отримані на <ftp://ftp.swpc.noaa.gov>

У день землетрусу приблизно о 18:30 доплерівські спектри стали дифузними, доплерівське зміщення частоти основної моди, флуктуюючи з періодом близько 3 хв, спочатку зменшувався від 0 до  $-0.2$  Гц, а потім збільшувався від  $-0.2$  до 0 Гц. Це тривало близько 60 хв. З 19:30 до 20:00 для основної моди  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Після 20:00 мали місце значні (до 0.3 Гц) варіації  $f_D(t)$ .

Додамо, що в інтервалі часу з 17:50 до 19:25 спостерігалися сильні (до 30 дБВ) варіації рівня амплітуди сигналу.

### 4.3.3 Аналіз результатів спостережень

Наведемо для прикладу результати спостережень для двох радіотрас.

*Радіотраса Hwaseong – Harbin.* Поведінка доплерівських спектрів у день землетрусу і в контрольні дні помітно відрізняється. При  $f_D(t) \approx 0$  Гц радіохвилі відбивалися від стабільного шару Е або  $E_s$ . Після 17:50 відбиття мало місце від F-області іоносфери. Цим пояснюються значні варіації  $f_D(t)$ . Якщо зміни характеру варіацій о 18:20 і 18:56 пов'язані з землетрусом, то спостережуваним збуренням відповідають часи запізнення  $\Delta t_1 = 12$  хв і  $\Delta t_2 = 48$  хв. Удавану швидкість поширення збурень можна оцінити з наступного співвідношення:

$$v = \frac{D}{\Delta t_1 - \Delta t_0}, \quad (4.2)$$

де  $\Delta t_0$  – час поширення збурення по вертикалі від поверхні Землі до іоносфери (до Е-області іоносфери  $\Delta t_0 \approx 5.5$  хв). Тоді із (4.2) маємо  $v_1 \approx 3.3$  км/с, а  $v_2 \approx 540$  м/с. Значення  $v_1$  близькі до швидкості сейсмічних хвиль, а значення  $v_2$  – до швидкості акустичних (інфразвукових) і атмосферних гравітаційних хвиль. На даній радіотрасі спостерігалися обидва типи хвиль. Для інфразвукових хвиль  $T \approx 3$  хв,



для других  $T \approx 20$  хв. Знаючи  $f_{Da1} \approx 0.05 - 0.10$  Гц і  $f_{Da2} \approx 0.20 - 0.25$  Гц, можна оцінити амплітуду відносних збурень концентрації електронів  $N$  [270]

$$\delta_{Na} = \frac{\Delta N_a}{N_0} = \frac{K(\theta)}{4\pi} \frac{cT}{L} \frac{f_{Da}}{f}, \quad (4.3)$$

де  $K(\theta)$  – коефіцієнт, що залежить від кута падіння  $\theta$  радіохвилі на іоносферу й висоти відбиття радіохвилі  $z_r$ , а також  $R$  і радіуса Землі,  $L \approx 2H$ ,  $H$  – висота однорідної атмосфери. При  $z_r \approx 200 - 250$  км,  $2H \approx 80$  км із (4.3) маємо  $K \approx 3.6 - 3.1$ . Тоді для інфразвуку  $\delta_{Na} \approx 0.15 - 0.31\%$ , а для атмосферної гравітаційної хвилі (АГХ) –  $\delta_{Na} = 7 - 8\%$  при  $f_{Da} \approx 0.25$  Гц.

Відзначимо, що в інтервалі часу 18:30 – 19:30 має місце антикореляція  $f_D(t)$  і  $A(t)$ . Збільшенню  $f_D$  на 0.5 Гц відповідає зменшення  $A$  на 30 дБВ. Така поведінка пов'язана зі збільшенням концентрації електронів у полі хвилі з  $T \approx 30$  хв на 7 – 8%. До зменшення  $A$  призводить дефокусування радіохвилі лінзою, утвореною в іоносфері при збільшенні  $N$  у полі хвилі. Горизонтальний розмір лінзи близько 270 – 450 км при швидкості АГХ 0.3 – 0.5 км/с. Такий же розмір і фокусуючої лінзи, що призводить до збільшення  $A$ .

*Радіотраса Goyang – Harbin.* У день землетрусу до 18:30  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Хвиля відбивалася від Е-області іоносфери, точніше від шару  $E_s$ . Після 18:30 амплітуда сигналу зменшилася на 25 дБВ, доплерівське зміщення частоти основної моди спочатку зменшився від 0 до  $-(0.15 - 0.25)$  Гц, а потім збільшився від цих значень до 0 Гц. Така поведінка  $A(t)$  і  $f_D(t)$  свідчить про те, що відбиття радіохвилі практично припинилося через те, що значення  $f$  наблизилося в нічний час до частоти проникнення радіохвилі через іоносферу. Для даної радіотраси плазмова частота, починаючи з якої хвиля проходить крізь іоносферу, не більше 3.6 – 4.0 МГц.

У флуктуаціях  $f_D(t)$  проявлялися квазіперіодичні процеси з  $T \approx 3$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. При цьому  $\delta_{Na} \approx 2 - 4\%$ .

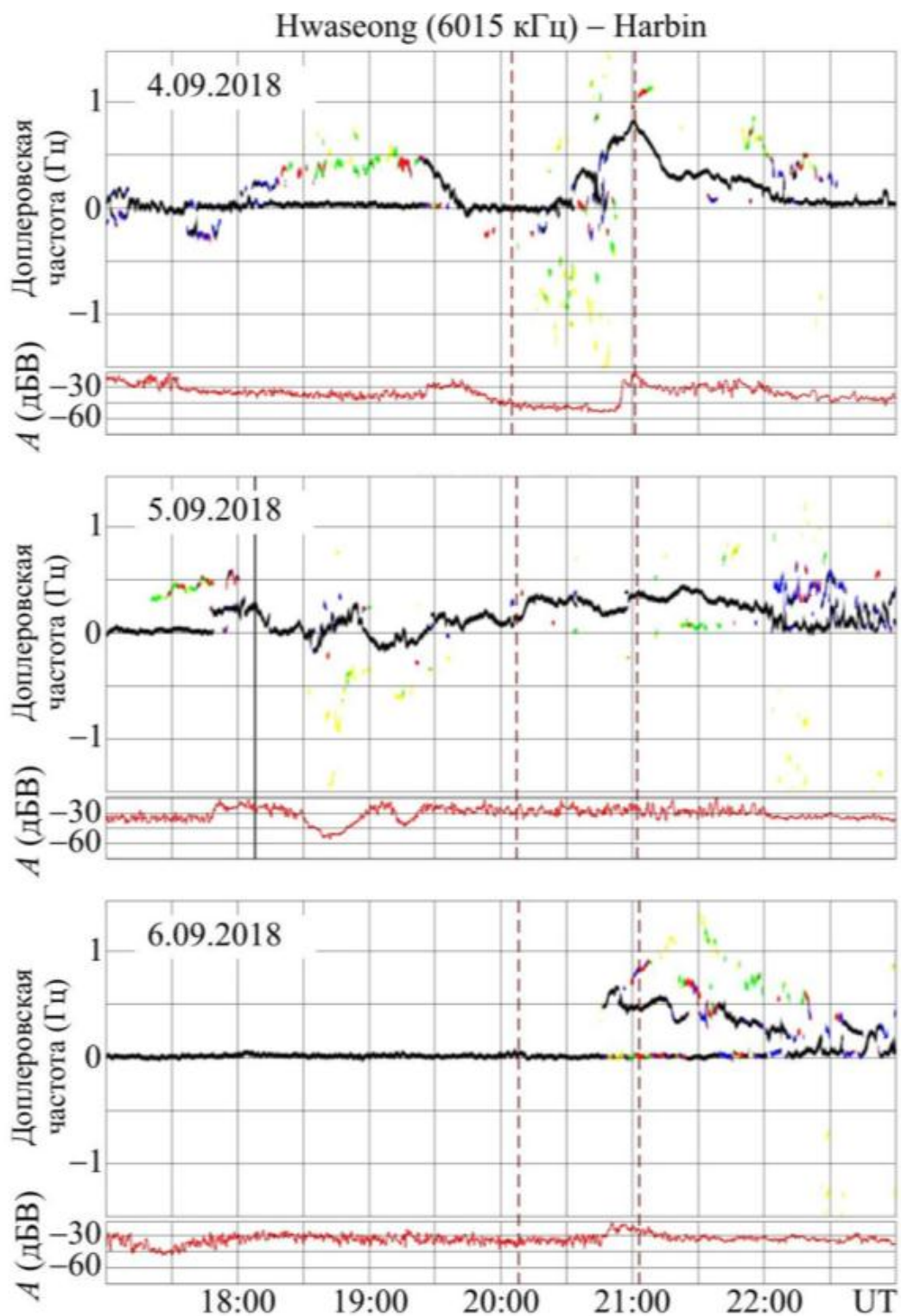


Рис. 4.10 Те саме, що й на рис. 4.1, але для 4–6 вересня 2018 р. для радіотраси Hwaseong–Harbin на 6015 кГц

Після 19:30 на можливі ефекти землетрусу наклалися ефекти ранкового сонячного термінатора.

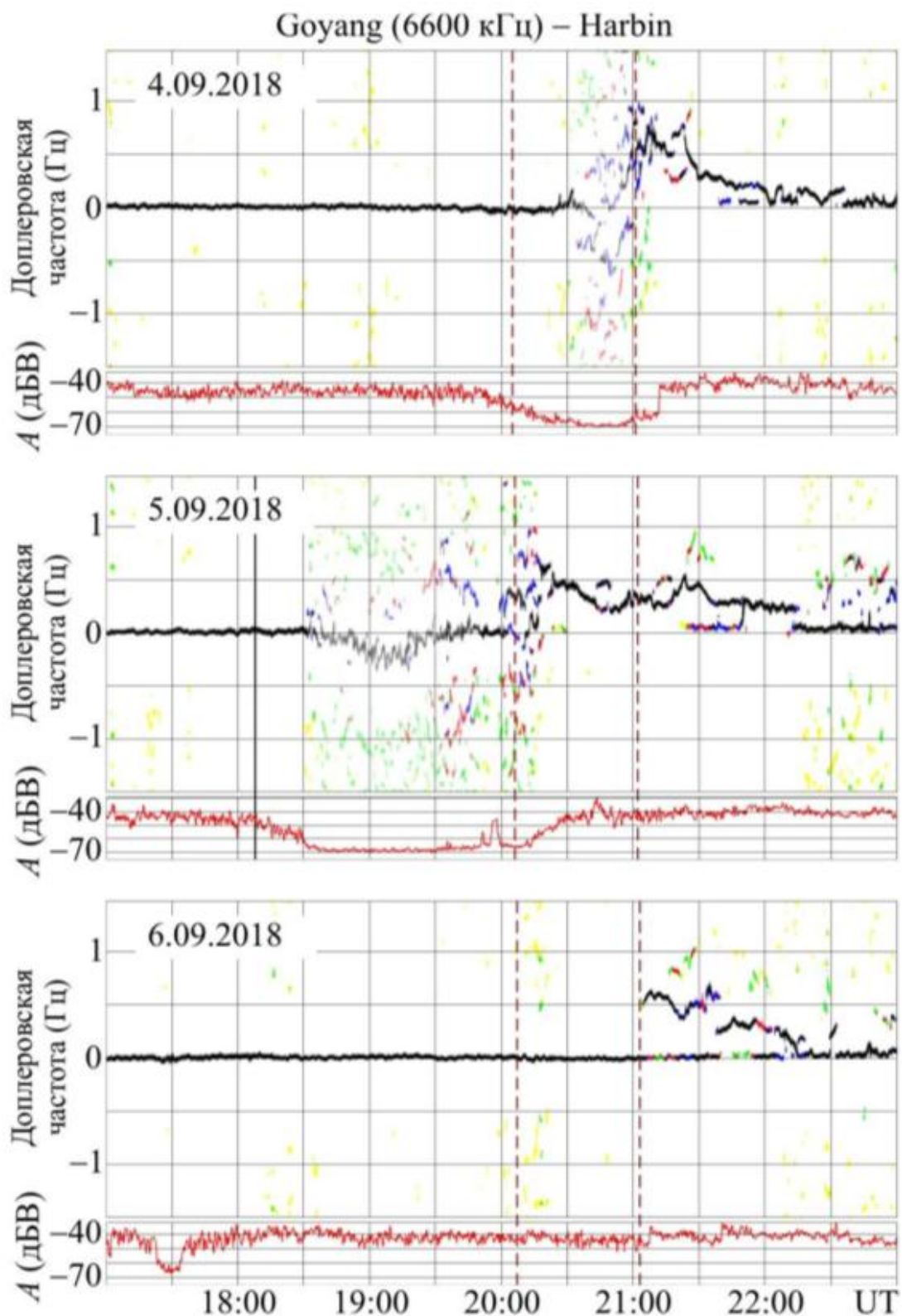


Рис. 4.11 Те саме, що й на рис. 4.1, але для 4–6 вересня 2018 р. для радіотраси Goyang–Harbin на 6600 кГц

В цілому викладені в статті результати відповідають результатам дослідження ефектів у іоносфері іншого землетрусу [303, 345].

#### 4.4 Землетрус 11 квітня 2019 р.

##### 4.4.1 Стан космічної погоди

Як видно з табл. 4.3, протягом 8–14 квітня 2019 р. стан космічної погоди був сприятливим для спостереження ефектів землетрусу в іоносфері. Максимальний планетарний індекс  $K_p$  не перевищував 4 (10 квітня 2019 р.), а мінімальне значення індексу  $D_{st}$  складало не менше за  $-34$  нТл.

Таблиця 4.3

Стан космічної погоди за 8–14 квітня 2019 р.

Дата	W	F 10.7	$K_p$		$D_{st}$ , нТл		$A_p$
			max	min	max	min	
8 квітня 2019 г.	12	79	3+	2–	–5	–27	11
9 квітня 2019 г.	12	79	3+	2–	–1	–21	9
10 квітня 2019 г.	13	78	4	1	–9	–34	14
11 квітня 2019 г.	13	79	3–	1–	–1	–17	6
12 квітня 2019 г.	14	77	3	1	–1	–21	7
13 квітня 2019 г.	14	78	3	0+	0	–17	7
14 квітня 2019 г.	11	75	2–	0+	2	–11	4

##### 4.4.2 Результати спостережень

Цей землетрус (підводний) з  $M \approx 6.0$  стався в 08:18:21 UT 11 квітня 2019 р. поблизу берегів Японії. Координати епіцентру наступні:  $40.41^\circ\text{N}$ ,  $143.298^\circ\text{E}$ ,  $h \approx 18$  км.

У якості приклада опишемо ефекти для двох радіотрас (рис. 4.12, 4.13).

*Радіотраса Hwaseong – Harbin.* Радіостанція Hwaseong, що випромінює на частоті 6015 кГц, знаходиться на території Південної Кореї. При цьому  $R \approx 950$  км, а  $D \approx 1415$  км.

З 10 по 12 квітня 2019 р. в інтервалі часу 07:00 – 10:45 спостерігалася мода з  $f_D(t) \approx 0$  Гц (рис. 4.12, а). Приблизно з 08:00 виникала друга мода, для якої  $f_D$  зменшувався від  $-0.2$  до  $-0.5$  Гц. Перед заходом Сонця (після 9:30) кількість мод збільшилася. Це тривало до 10:30 – 10:45. Потім доплерівський спектр був переважно одномодовим. Після 11:30 – 12:00 флуктуації  $f_D(t)$  збільшувалися до  $0.3$ – $0.4$  Гц.

У день землетрусу спостерігалось дві відмінності в доплерівських спектрах. По-перше, в інтервалі часу 08:55 – 09:25 різко зменшилося значення  $f_D$  від  $-(0.20 - 0.25)$  Гц до  $-(0.50 - 0.55)$  Гц. По-друге, з 09:25 до 10:40 у доплерівському спектрі чітко спостерігалися 4 моди, що відстоять одна від одної на  $0.2 - 0.3$  Гц. Флуктуації амплітуд протягом усіх трьох діб практично не відрізнялися. З 08:50 до 09:50 виявлені квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з  $T \approx 15$  хв і  $f_{Da} \approx 0.10 - 0.12$  Гц (рис. 4.12, б). Крім того,  $\overline{f_D}(t)$  зменшувалося від  $-0.1$  до  $-0.2$  Гц. В інтервалі часу 09:55 – 10:50 доплерівські спектри стали дифузними. Одночасно з цим амплітуда сигналу зменшувалася на 10 дБВ, чого не спостерігалось в контрольні дні.

*Радіотраса Shijiazhuang – Harbin.* Радіопередавальний пристрій, що функціонує на частоті 9500 кГц, дислоковано на території КНР. При цьому  $R \approx 1310$  км, а  $D \approx 1950$  км.

З 08:50 до 09:50 11 квітня 2019 р. виявлені квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з  $T \approx 15$  хв і  $f_{Da} \approx 0.10 - 0.12$  Гц (рис. 4.13, б). Крім того,  $\overline{f_D}(t)$  зменшувалося від  $-0.1$  до  $-0.2$  Гц. В інтервалі часу 09:55 – 10:50 доплерівські спектри стали дифузними. Одночасно з цим амплітуда сигналу зменшувалася на 10 дБВ, чого не спостерігалось в контрольні дні.

#### 4.4.3 Аналіз результатів спостережень

Загальним ефектом для описаних радіотрас була генерація квазіперіодичних збурень з  $T \approx 15$  хв і  $f_{Da} \approx 0.10 - 0.12$  Гц. Тоді зі співвідношення (4.3) маємо

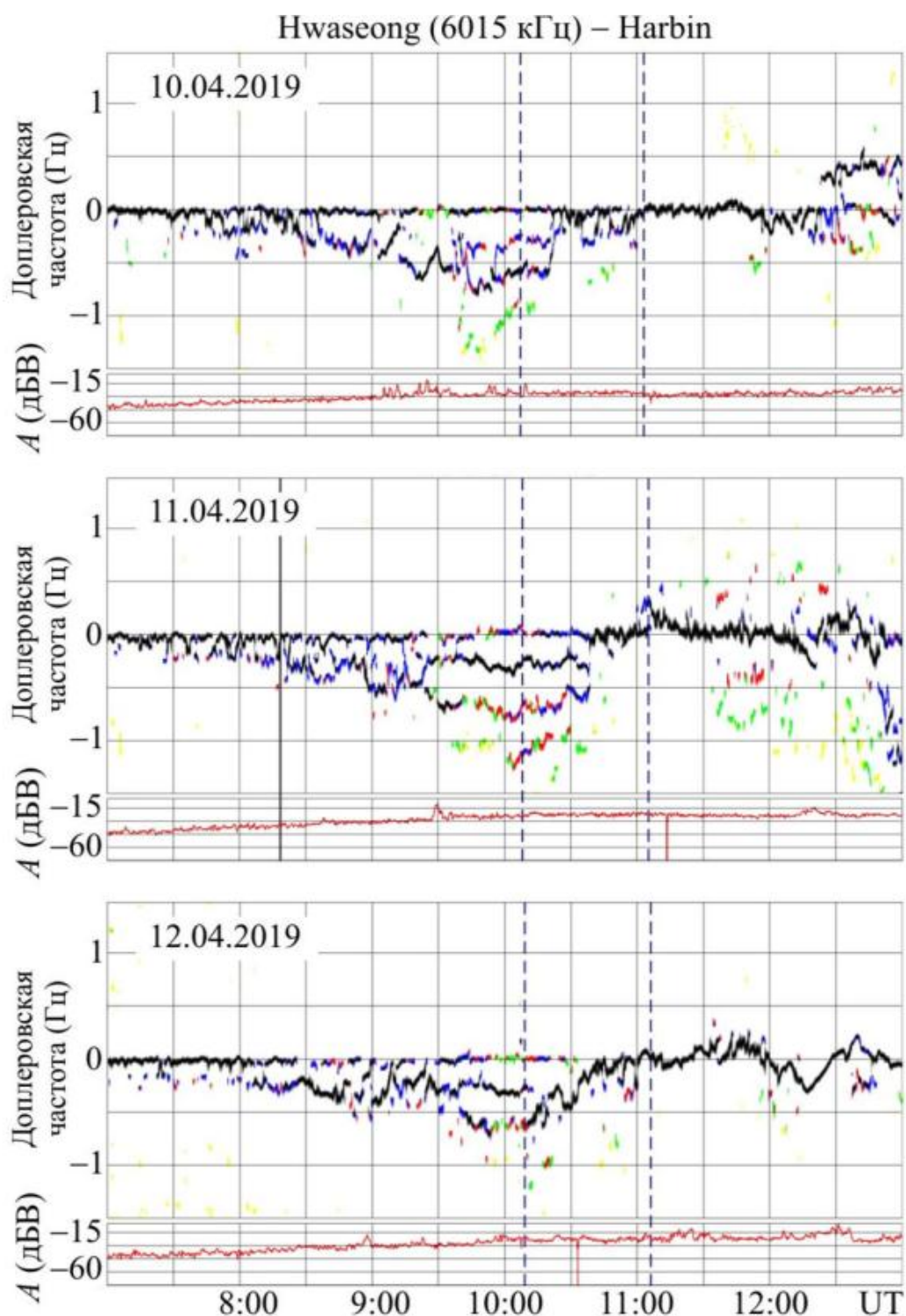


Рис. 4.12 Те саме, що й на рис. 4.1, але для 10–12 квітня 2019 р. для радіотраси Hwaseong–Harbin на 6015 кГц

$\delta N \approx 1.7\text{--}2\%$ . Іншими спільними ефектами були поява дифузності та зменшення амплітуди на 10 дБВ.



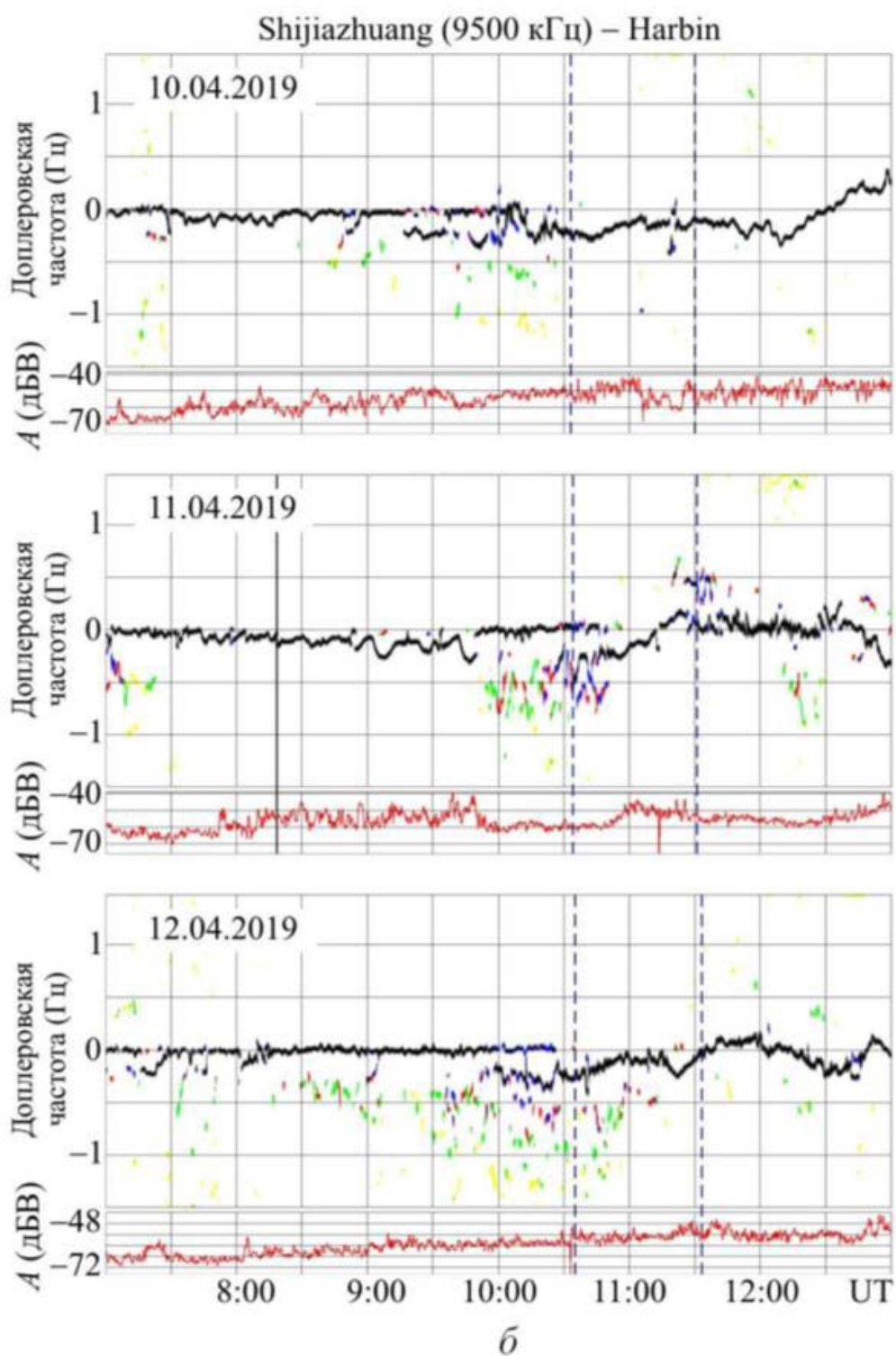


Рис. 4.13 Те саме, що й на рис. 4.1, але для 10–12 квітня 2019 р. для радіотраси Shijiazhuang–Harbin на 9500 кГц

#### Висновки до розділу 4

1. Продемонстрована можливість спостереження на відстанях  $\sim 1\text{--}2$  тис. км

динамічних процесів у іоносфері, супутніх землетрусу помірної сили ( $M \approx 5.9$ ). Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період 4–5 хв), генеровані поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів при цьому становила 4.5–9 %. Тривалість цуга коливань була в межах 24–55 хв. Швидкість поширення хвильових збурень була близько 3 км/с. Виявлено хвильові збурення (період 15–30 хв), які могли бути згенеровані поблизу епіцентру та поширювалися від нього у вигляді атмосферних гравітаційних хвиль, модулюючих концентрацію електронів у іоносфері. Відносна амплітуда квазіперіодичних збурень концентрації електронів становила 30–55 %. Тривалість хвильового цуга досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с.

2. Проведено аналіз результатів багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери в день помірного ( $M \approx 6.6$ ) землетрусу в Японії 5 вересня 2018 р. і в контрольні дні. Виявлено, що характер варіацій доплерівських спектрів, доплерівського зміщення частоти основної моди й амплітуди сигналу в день землетрусу і в контрольні дні помітно відрізнявся. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень: 3.3 км/с і близько 0.5 км/с. Перша швидкість близька до швидкості сейсмічних хвиль, а друга – до швидкості акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. За оцінками амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової та атмосферної гравітаційної хвиль була  $\sim 0.15$ – $0.31\%$  і 7–8% відповідно.

3. На відстанях 1–2 тис. км від епіцентру помірного ( $M = 6.0$ ) землетрусу в Японії 11 квітня 2019 р. виявлена реакція іоносфери на сейсмічну подію. Землетрус супроводжувався розширенням доплерівських спектрів на 1–1.5 Гц



в діапазоні частот 5 – 9.8 МГц, генерацією АГХ, що мають швидкість 0.5–1 км/с і період 8 – 20 хв, і генерацією інфразвуку з періодом 2–5 хв, що мають швидкість 0.3–0.4 км/с. Відносні збурення концентрації електронів складала ~1–10%.

4. Загальним для іоносферних ефектів землетрусів було наступне. Землетруси супроводжувалися розширенням доплерівських спектрів і аперіодичними та квазіперіодичними збуреннями, що були нехарактерними для контрольних днів. Для всіх землетрусів удавана швидкість складала близько 3 і 0.3 км/с. Збурення концентрації електронів сягали від 1% до ~10% і більше.

Основні результати цього розділу відображені в роботах автора [279, 303, 345–348].

## РОЗДІЛ 5

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГЕОКОСМОСІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ВПЛИВ ТАЙФУНІВ

#### 5.1 Загальні відомості

Тайфуни належать до потужних атмосферних процесів, які виникають в системі океан–суша–атмосфера. Тайфуни можуть відчутно впливати на всю систему ЗАІМ, а отже і на атмосферно-космічні радіоканали [3, 21].

Незважаючи на те, що відгуки іоносфери на урагани (тайфуни) вивчалися десятки років, їх дослідження залишається актуальною проблемою. Для цього є кілька причин. По-перше, реакція іоносфери значно залежить від особливостей і параметрів конкретного тайфуну. По-друге, реакція залежить від сонячної активності, пори року, місцевого часу, стану тропосферної та космічної погоди. Отже, дія двох подібних тайфунів не дає однакової реакції іоносфери. По-третє, доцільно, щоб нові методи застосовувалися у виявленні іоносферних ефектів від тайфунів, які надають додаткову інформацію, на додаток до традиційних методів, методу вертикального зондування та мереж супутників GPS. У цьому дослідженні використовується багаточастотна багатотрасова радіосистема для похилого зондування іоносфери Харбінського інженерного університету (КНР).

Метою цього розділу є виклад результатів спостереження за варіаціями характеристик радіохвиль ВЧ діапазонів в іоносфері протягом дії унікального супертайфуну Hagibis 6 – 13 жовтня 2019 р. Для спостережень використовувався багаточастотний багатотрасовий програмно-апаратний комплекс Харбінського інженерного університету (КНР). Унікальність супертайфуну полягає в його параметрах, які будуть описані далі.

## 5.2 Ефекти тайфуну Hagibis

### 5.2.1 Загальні відомості про супертайфун Hagibis

Найсильніший за останні 60 років супертайфун Hagibis (номер 201919) існував з 5 по 13 жовтня 2019 р. (табл. 5.1). Його траєкторія наведена на рис. 5.1 [352] Тиск у супертайфуні, флуктуюючи, змінювався від 1010 гПа до 904 гПа 10 жовтня 2019 р. [353]. З 12:00 7 жовтня до 06:00 10 жовтня 2019 р. у середньому тиск склав 915 гПа, а дефіцит тиску – 95 гПа. Супертайфун Hagibis відноситься до найтриваліших. Його максимальні параметри підтримувались протягом більше 2.5 діб, точніше протягом 66 годин. Найбільша швидкість падіння тиску склала – 43 гПа/год з 6 на 7 жовтня 2019 р. Найбільша швидкість його зростання була 1.1 гПа/год з 10 по 13 жовтня 2019 р.

Швидкість вітру  $v$  в супертайфуні збільшувалася від 28 км/год (7.8 м/с) 5 жовтня 2019 р. до 259 км/год (71.8 м/с) 7 жовтня 2019 р. Приблизно такою ж вона була з 7 по 10 жовтня 2019 р. Максимальна швидкість збільшення  $v$  досягала 10 м/с за 1 год, а швидкість зменшення – 2.2 м/с за 1 год.

При швидкості  $v \approx 71.8$  м/с та радіусі ядра супертайфуну 370 км, його енергія та максимальна потужність становили близько  $5.5 \cdot 10^{18}$  Дж і  $1.1 \cdot 10^{14}$  Вт відповідно.

Швидкість поступального руху, флуктуюючи, змінювалась від 11 до 37 км/год при середній швидкості 27 км/год (7.5 м/с). Після 12 жовтня 2019 р. вона епізодично збільшувалась від 39 км/год до 107 км/год (від 10.8 м/с до 29.7 м/с).

Найближче супертайфун підійшов до Японії 12 жовтня 2019 р. Від нього найбільше постраждав о. Хонсю. Збиток від супертайфуну склав 1.5 млрд доларів США. Загинуло 98 осіб, 11 зникло безвісти, поранено більше 200 осіб. 200 тисяч будинків залишилось без світла. Супертайфун

супроводжувався сильними повеннями.

### 5.2.2 Аналіз стану космічної погоди

Спочатку проаналізуємо стан космічної погоди, без якого неможливий пошук реакції супертайфуну на іоносферу. Часові залежності ряду параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля, енергії, впроваджуваної в магнітосферу, і геомагнітних індексів наведені на рис. 5.2. З рис. 5.2 видно, що концентрація частинок  $n_{sw}$  в сонячному вітрі змінювалась найчастіше в межах  $(5-10) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Виняток з цього спостерігався 4, 9 і 15 жовтня 2019 р., коли  $n_{sw}$  досягала  $26 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ ,  $15 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  і  $27.4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ .

Таблиця 5.1

#### Основні відомості про тайфун Hagibis (частина інформації отримана з [352, 353])

Час початку	2019-10-05 18:00:00 UT
Час закінчення	2019-10-13 03:00:00 UT
Тривалість тайфуну	177 год / 7.375 днів
Мінімальний тиск	915 гПа
Максимальний дефіцит тиску	95 гПа
Максимальна швидкість вітру	259 км/год (71.8 м/с)
Найменший радіус вітру бурі	370 км
Найбільший радіус вітру бурі	750 км
Довжина траєкторії	4785 км
Середня швидкість	27.0 км/год (7.5 м/с)
Діапазон руху	Latitude 25.8N: Longitude 20.4E
Кінетична енергія тайфуну	$5.5 \cdot 10^{18}$ Дж

Потужність тайфуну	$1.1 \cdot 10^{14}$ Вт
Опади	260–300 мм/год
Максимальне падіння тиску	–15 гПа / 6 год –30 гПа / 12 год –60 гПа / 24 год –85 гПа / 48 год
Початок даних	2019-10-04 18:00:00 UT
Кінець даних	2019-10-14 18:00:00 UT
Тривалість даних	240 год/10.0 днів

Температура частинок  $T_{sw}$  в сонячному вітрі, як правило, змінювалась слабо: від  $0.2 \cdot 10^5$  до  $10^5$  К. Лише 10 жовтня 2019 р. в першій половині доби вона збільшилась до  $2.4 \cdot 10^5$  К.

Динамічний тиск плазми  $p_{sw}$  сонячного вітру найчастіше змінювався в межах 1–2 нПа. Лише 4, 9 та 15 жовтня 2019 р. він збільшувався до 7.1 нПа, 4 нПа і 6.1 нПа відповідно.

Компоненти  $B_y$  і  $B_z$  міжпланетного магнітного поля змінювались наступним чином. Зазвичай варіації цих компонент не перевищували  $\pm 5$  нТл. Лише 9, 13 і 14 жовтня 2019 р. спостерігалось відхилення від цього значення. Компонента  $B_y$  збільшувалася до 5.1 нТл 10 жовтня 2019 р., а також до 3.7 нТл 16 жовтня 2019 р. Мінімальне значення компоненти  $B_y$ , рівне  $-9.2$  нТл, відмічалось 9 жовтня 2019 р.

Швидкість частинок  $V_{sw}$  в сонячному вітрі зазвичай знаходилась в межах 400 – 450 км/с за винятком 10–11 жовтня 2019 р., коли  $V_{sw}$  досягла 516 км/с.

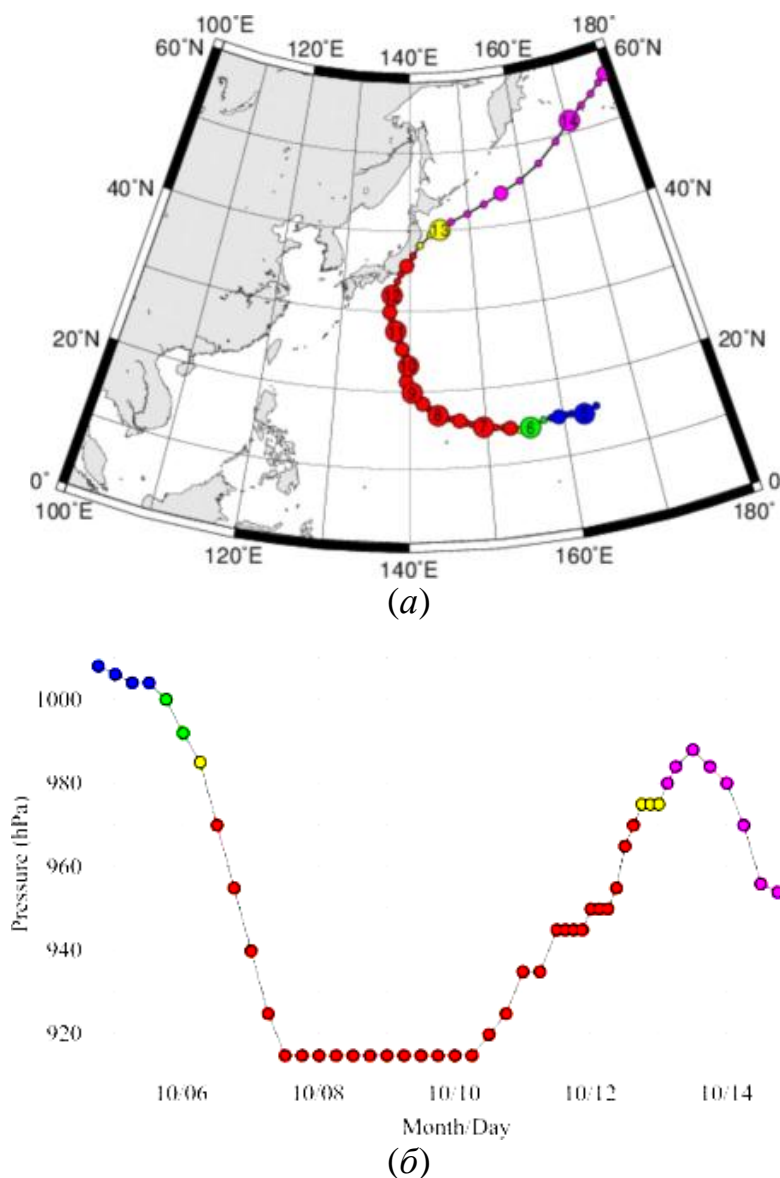


Рис. 5.1 Діаграма траєкторії супертайфуну Hagibis: (а) траєкторія; (б) тиск у тайфуні [353, 354]. Великі крапки позначають положення тайфуну щодня о 0000 UT. Цифра в колі означає «день». Середні точки щодня позначають положення тайфуну о 1200 UT. Маленькі крапки позначають положення тайфуну кожні 3–6 годин. Положення кожні 3 години може бути інтерпольованим. Колір точок означає наступне: синій позначає тропічну депресію (клас 2 [352]), зелений позначає тропічний шторм (клас 3), жовтий позначає сильну тропічну бурю (клас 4), червоний позначає тайфун (клас 5), а пурпуровий позначає позатропічний циклон (клас 6). Червоне та жовте кола, наприклад, представляють 50-вузловий та 30-вузловий вітрові кола відповідно [352, 354]

Максимальні (6.0 и 6.1 нТл) значення компоненти  $B_z$  спостерігались 9 і 15 жовтня 2019 р., а мінімальні (–6.9 і –3.7 нТл) – 10 і 14 жовтня 2019 р.

Часові варіації енергії, що надходить у магнітосферу за одиницю часу, були незначними ( $\sim 15$  ГДж/с). Лише 9, 10 і 14 жовтня 2019 р. мали місце сплески  $\varepsilon_A$  від 4 до 6.5 ГДж/с. Їх тривалість не перевищувала 3–4 години.

Максимальне значення індекса  $K_p = 4.3$  відмічалось 10 жовтня 2019 р. Значення  $K_p = 3.7$  спостерігалось 9 і 11 жовтня 2019 р. Мінімальне значення  $K_p = 0$  зареєстроване 13 жовтня 2019 р. В той же день  $D_{st} \approx 0$  нТл. Мінімальне значення  $D_{st}$ -індексу, рівне –28 нТл, відмічалось 10 жовтня 2019 р., максимальне значення, рівне 31 нТл – 15 жовтня 2019 р. Потік сонячного радіовипромінювання з довжиною хвилі 10.7 см протягом усього експерименту залишався незмінним (рівним  $\sim 68$  Ян). Відносно малі піки в параметрах сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля дозволяють нам сказати, що магнітне поле було спокійним або слабко збуреним, а іоносфера була до деякої міри не збуреною. Таким чином, стан космічної погоди був цілком сприятливим для спостереження іоносферних ефектів супертайфуну Hagibis.

### 5.2.3 Аналіз стану іоносфери

Стан іоносфери грає ключову роль в поширенні ВЧ радіохвиль, і воно контролювалось за допомогою іонозонду, який розташовано поблизу м. Wakkanai (Японія) (45.16°N, 141.75°E) [356].

Часові залежності основних параметрів іонограм наведені на рис. 5.3а,б–5.4а,б. З цих рисунків видно, що частота  $f_{\min}$  знаходилась в межах 1–1.5 МГц.

Частота  $f_oE$  в денний час змінювалась від 1.7 до 3.2 МГц. Висота  $h'E$  флукутувала біля 100 – 110 км. Епізодично вона збільшувалась до 130 км.

Частота  $f_oE_s$  з 6 по 10 жовтня 2019 р. зазвичай знаходилась в межах 3–4 МГц, а з 11 по 13 серпня вона епізодично збільшувалась до 7–9 МГц. Висота  $h'E_s$  найчастіше флукутувала в діапазоні від 95 до 105 км. В денний час вона збільшувалась до 140–160 км.

Частота  $f_oF$  в денний час зменшувалась від 6–7 до 4 МГц. В нічний час вона складала 3–4 МГц. 8 жовтня 2019 р. з 11:00 до 16:00 ця частота досягала 4.8 МГц, в той час, коли в контрольний день вона була близькою до 3.5 МГц. 10, 11 та 12 жовтня 2019 р. з 07:00 до 12:00–14:00 частота  $f_oF$  на 1–1.5 МГц була більше, навпаки, мало місце зменшення  $f_oF$  на 0.4–0.8 МГц. Висота  $h'F$  в денний час займала діапазон 180–200 км, а в нічний час – 220–260 км.

Варіації параметрів іонограм в збурені дні (точніше, ночі) порівняно з контрольним днем можуть свідчити про наявність реакції іоносфери на дію супертайфуну Hagibis.

#### 5.2.4 Результати похилого зондування іоносфери

Вимірювання виконані для 11 з 14 радіотрас. На трьох з них (частоти 9.52 МГц, 9.675 МГц і 9.83 МГц) режими роботи радіопередавальних пристроїв виявились малопридатними для подальшого аналізу. Далі наводяться результати аналізу для 8 радіотрас. При пошуку реакції іоносфери на супертайфун відзначалися будь-які зміни в доплерівських спектрах (ДС) і амплітуді сигналу  $A$ , які були відсутні в контрольні дні. В якості контрольних днів обрано 6 і 13 жовтня 2019 р., коли тайфун був апіорі слабкий і знаходився на великій відстані від радіотрас зондування. Крім того, в ці дні геомагнітна обстановка була спокійною. Дійсно, 6 жовтня 2019 р.  $K_p$ -індекс змінювався від 0 до 2,  $D_{st} \approx 0$  нТл.



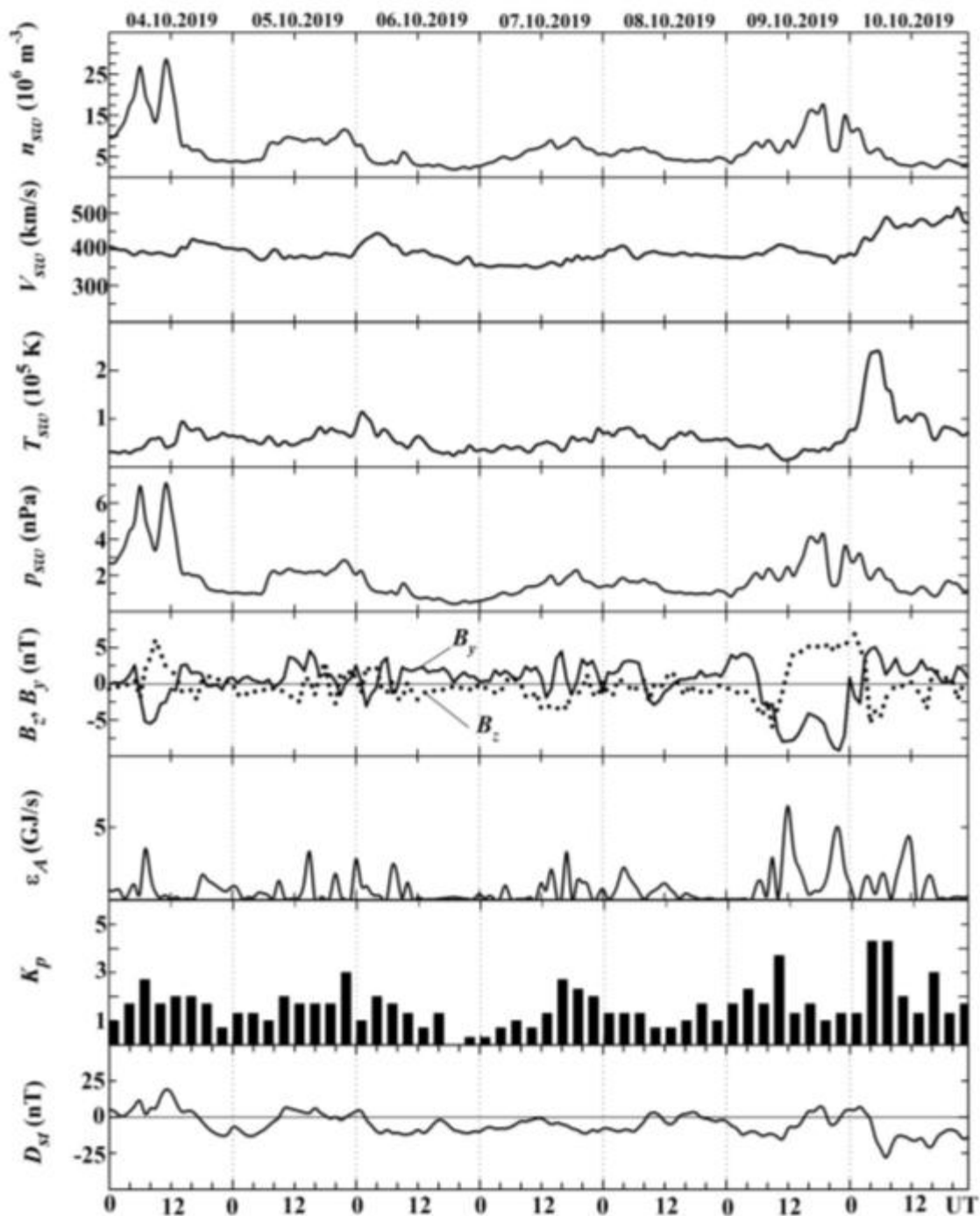


Рис. 5.2 Залежності параметрів сонячного вітру від всесвітнього часу: концентрація протонів  $n_{sw}$ , температура  $T_{sw}$ , швидкість потоку плазми  $V_{sw}$  (отримано з [357]), розрахований динамічний тиск  $p_{sw}$ , компоненти  $B_z$  і  $B_y$  міжпланетних магнітних полів (отримано за посиланням [357]), розрахована вхідна енергія за одиницю часу,  $\epsilon_A$ , від сонячного вітру в магнітосферу Землі;  $K_p$  та  $D_{st}$ -індекси (отримано з [357]) за період з 4 жовтня по 10 жовтня 2019 р. Дати вказані вздовж верхньої осі абсцис

Зауважимо, в усі дні на всіх радіотрасах чітка реакція ДС і ДЗЧ відмічалась в інтервали часу, близькі до інтервалів часу проходження

вечірнього та ранкового термінаторів.

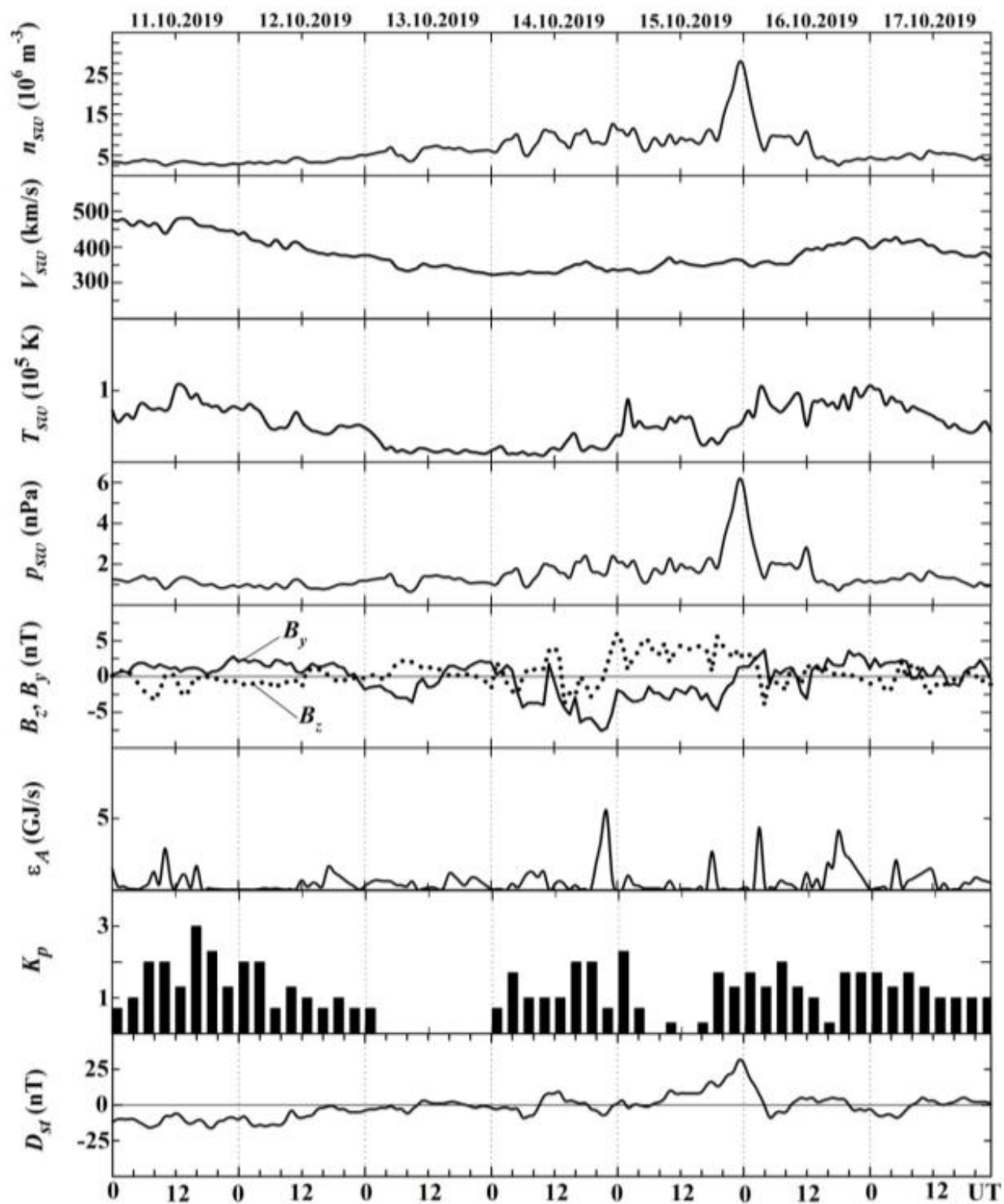


Рис. 5.2 (продовження для 11–17 жовтня 2019 р.)

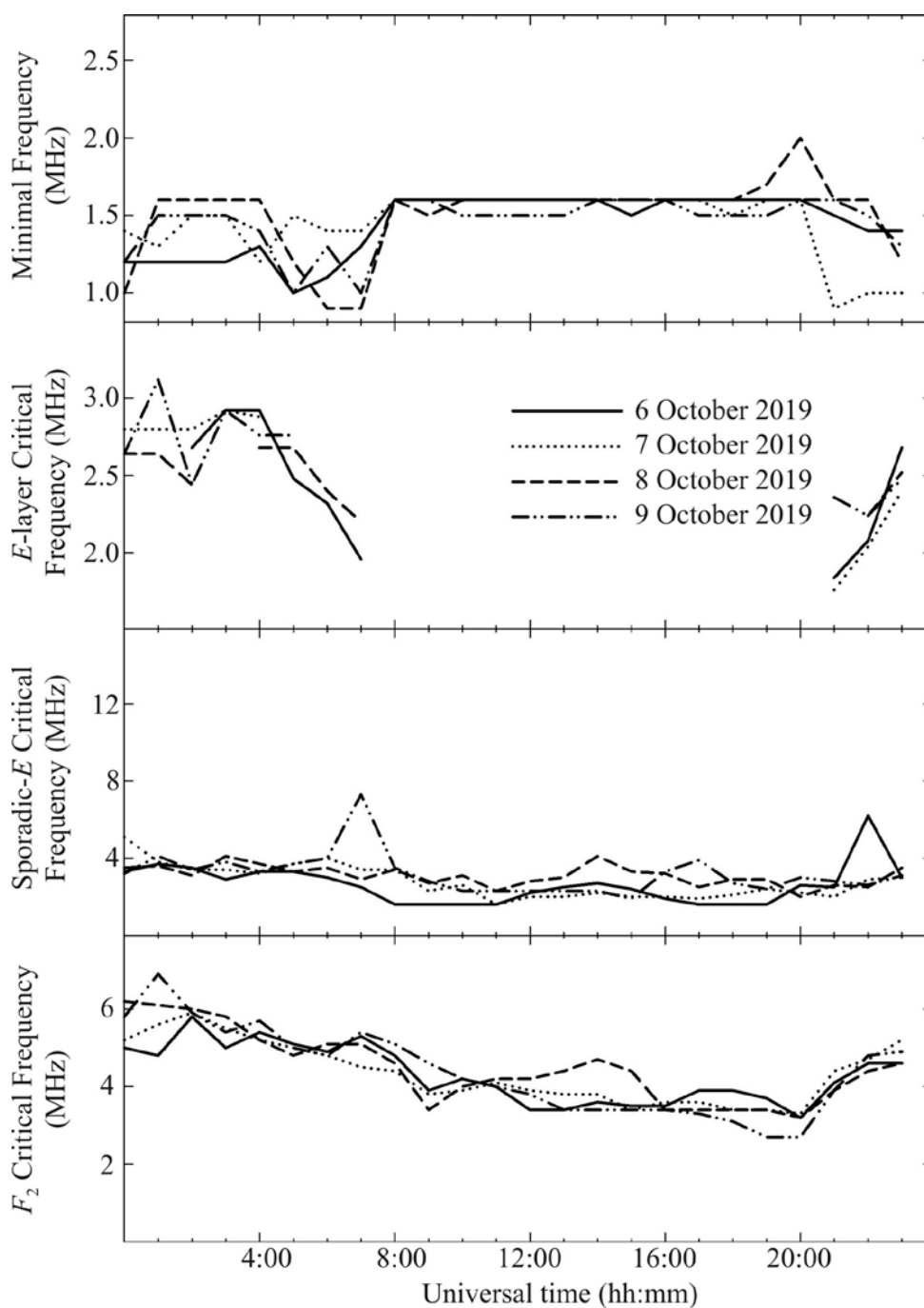


Рис. 5.3а Залежність основних параметрів іонограми від всесвітнього часу: мінімальна частота  $f_{\min}$ , що спостерігається на іонограмах, критична частота  $f_oE$  шару E, критична частота  $f_oE_s$  спорадичного шару  $E_s$ , критична частота  $f_oF$  шару F, для звичайної хвилі на панелях зверху вниз, відповідно, 6–9 жовтня 2019 р. Отримано з [356]. Дані іонозондів з Wakkanai, Японія ( $45.39^\circ\text{N}$ ,  $141.68^\circ\text{E}$ )

*Радіотраса Lintong/Pucheng–Harbin.* Радіопередавальний пристрій, що випромінює на частоті 5.0 МГц, знаходиться на території КНР. Довжина

радіотраси уздовж дуги великого кола  $R \approx 1875$  км.

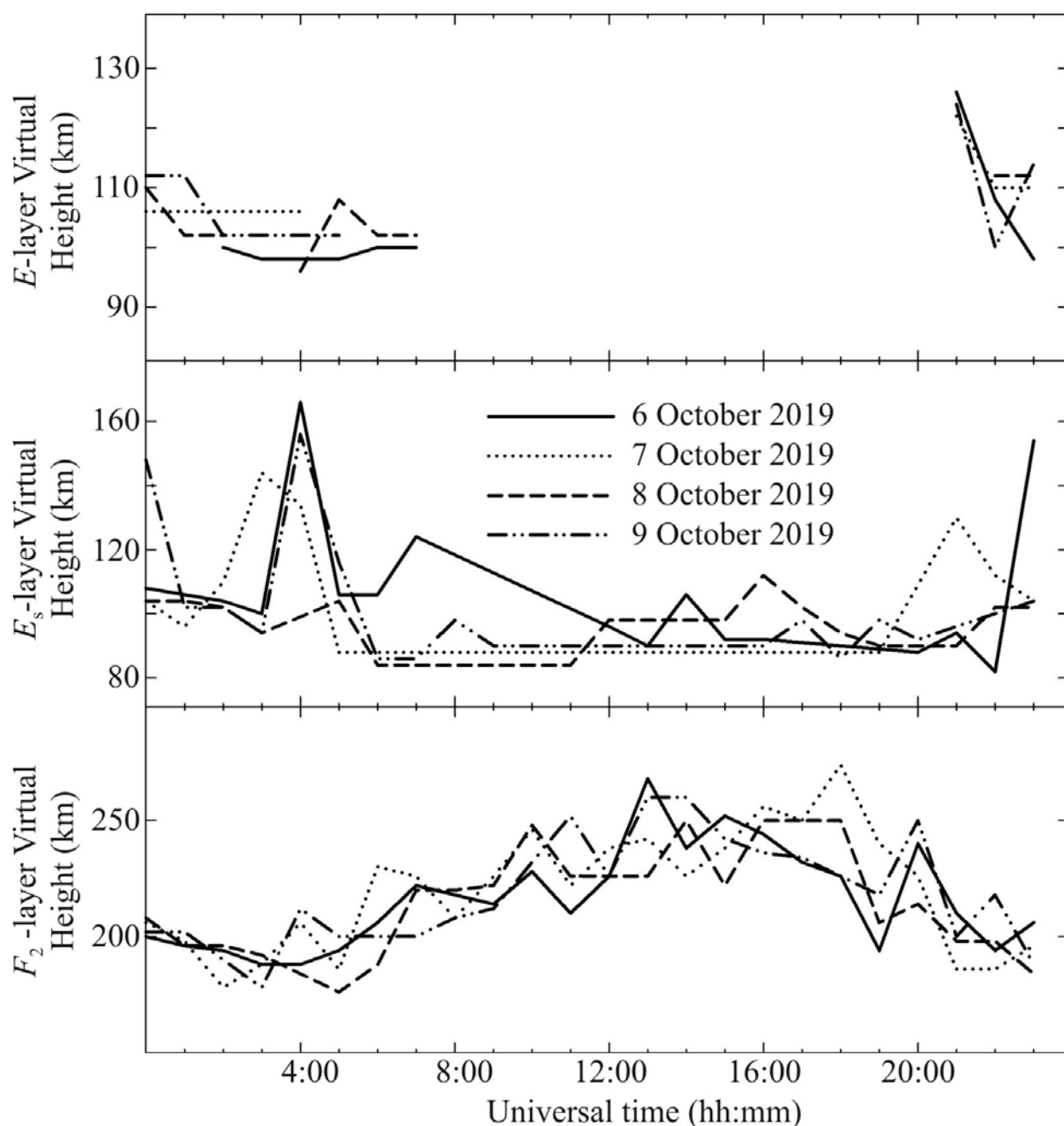


Рис. 5.36 Залежність основних параметрів іонограм від всесвітнього часу: діюча висота  $h'E_s$  спорадичного шару  $E_s$ ; діюча висота  $h'E(t)$  шару  $E$ ; діюча висота  $h'F$  шару  $F$ , які спостерігались протягом 6–9 жовтня 2019 р. Отримано з [356]. Дані іонозондів з Wakkanai, Японія ( $45.39^\circ\text{N}$ ,  $141.68^\circ\text{E}$ )

Варіації ДС були незначними (рис. 5.5). Збільшення варіацій спостерігалось

в інтервалах часу, як були пов'язані з проходженням сонячного термінатора.

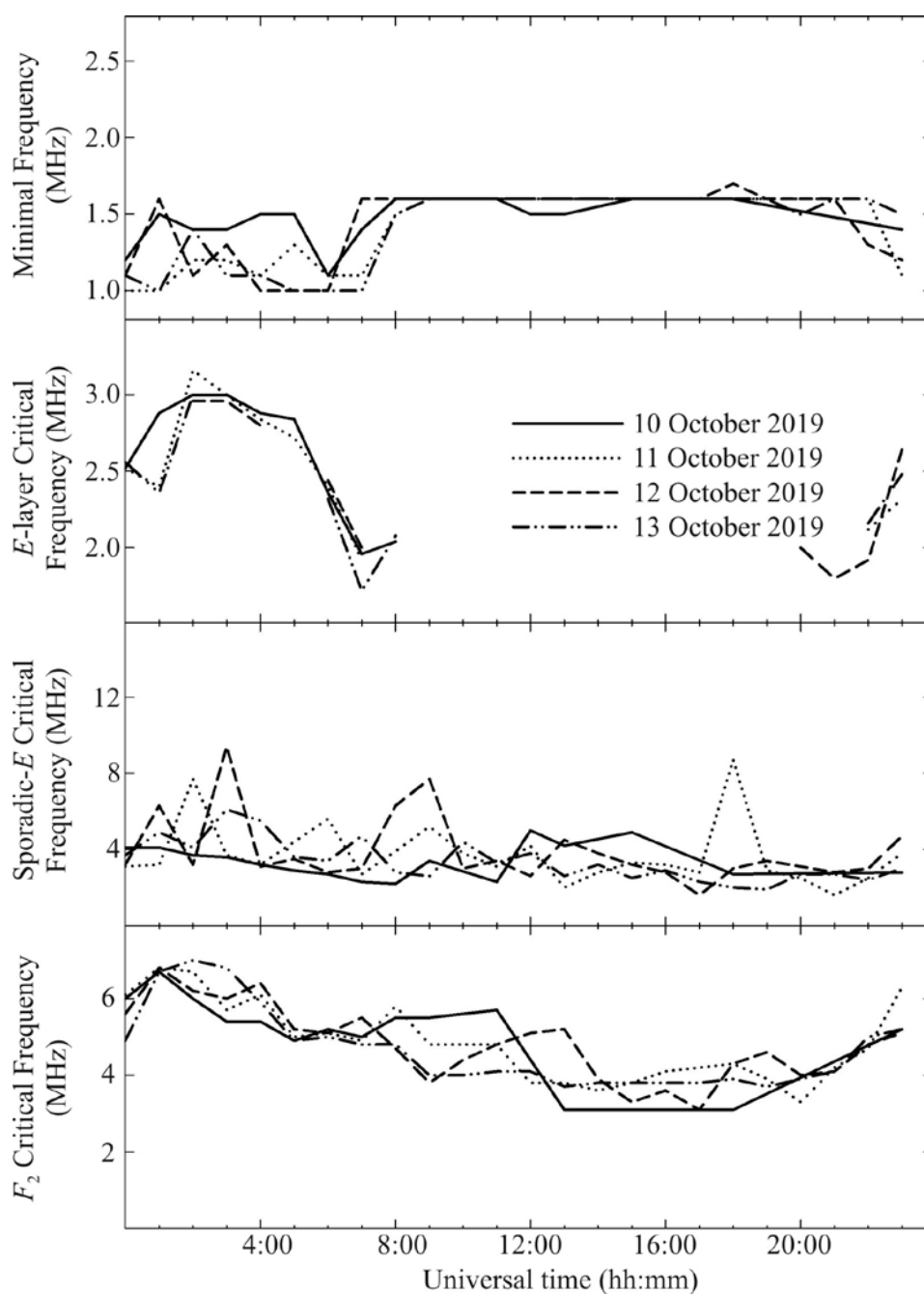


Рис. 5.4а Залежність основних параметрів іонограм від всесвітнього часу: мінімальна частота  $f_{\min}$ , яка спостерігається на іонограмах, критична частота  $f_oE$  шару E, критична частота  $f_oE_s$  спорадичного шару  $E_s$ , критична частота  $f_oF$  шару F для звичайної хвилі на панелях зверху вниз, відповідно, на період 10–13 жовтня 2019 р. Отримано з [356]. Дані іонозондів з Wakkanai, Японія (45.39°N, 141.68°E)

У денний час 6 жовтня 2019 р. ДЗЧ  $f_D \approx 0$  Гц, а в нічний час рівень варіацій ДЗЧ не перевищував 0.2–0.3 Гц. Відзначалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодом  $T \approx 30\text{--}50$  хв і амплітудою  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. Добові варіації амплітуди сигналу  $A$  досягали 20–30 дБВ, а її варіації в нічний час не перевищували  $\pm 5$  дБВ.

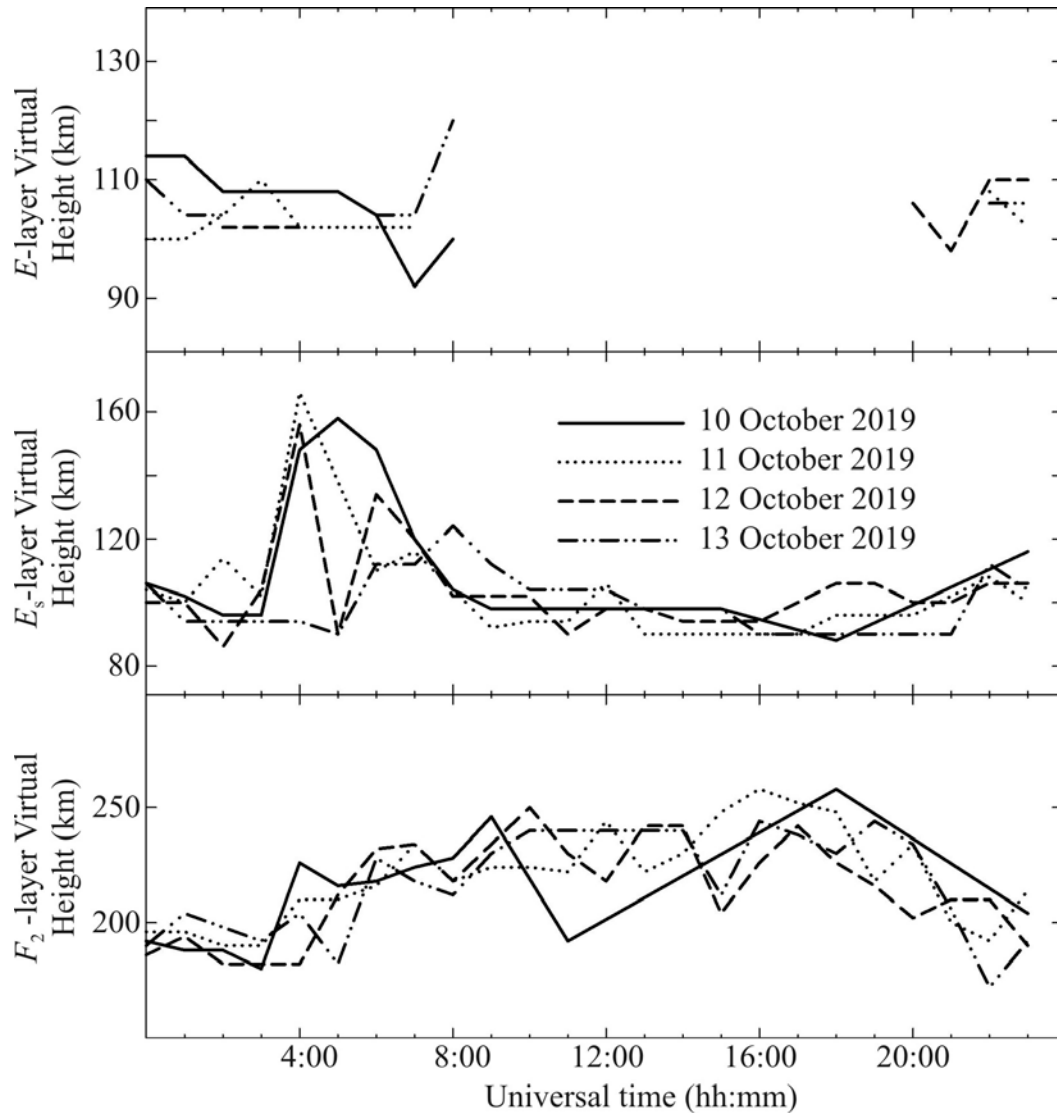


Рис. 5.46 Залежність основних параметрів іонограм від всесвітнього часу: діюча висота  $h'E_s$  спорадичного шару  $E_s$ ; діюча висота  $h'E(t)$  шару  $E$ ; діюча висота  $h'F$  шару  $F$ , які спостерігались протягом 10–13 жовтня 2019 р. Отримано з [356]. Дані іонозондів з Wakkanai, Японія ( $45.39^\circ\text{N}$ ,  $141.68^\circ\text{E}$ )

7 жовтня 2019 р. в денний час  $f_D \approx 0$  Гц, а в нічний час ДЗЧ змінювалось від  $-0.2$  Гц до  $0.3$  Гц. Спостерігались слабкі коливання ДЗЧ з  $T \approx 20$  хв,  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц,

а також сильніші коливання з  $T \approx 60\text{--}90$  хв і  $f_{Da} \approx 0.2\text{--}0.3$  Гц. Варіації  $A$  при цьому були незначними ( $\pm 5$  дБВ).

Поведінка  $f_D(t)$  і  $A(t)$  8 жовтня 2019 р. була в значній мірі подібна їх поведінці 6 жовтня 2019 р. Відзначалось розширення ДС в нічний час до  $0.5\text{--}0.7$  Гц.

9 жовтня 2019 р. варіації  $f_D(t)$  і  $A(t)$  дещо посилились у порівнянні з попереднім днем. З 14:00 до 16:00 ДС стали дифузними. Спостерігалось їх розширення від  $0.2$  Гц до  $1.3$  Гц. Квазіперіодичні коливання мали періоди від  $20$  до  $60$  хв і амплітуду  $f_{Da} \approx 0.1\text{--}0.3$  Гц. Варіації  $A(t)$  в нічний час не перевищували  $\pm 5$  дБВ.

10 – 12 жовтня 2019 р. збільшилась до  $0.2$  Гц амплітуда коливань з  $T \approx 60\text{--}80$  хв. 12 жовтня 2019 р. також спостерігались коливання з  $T \approx 30$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц.

13 жовтня 2019 р. флуктуації ДЗЧ були відносно невеликими ( $\pm 0.1$  Гц). Квазіперіодичні процеси були слабо вираженими. Варіації  $A(t)$  в нічний час, навпроти, були квазіперіодичними з амплітудою біля  $4$  дБВ і періодом  $T \approx 35$  хв. Зазначалось розширення ДС від  $-1.5$  Гц до  $1$  Гц.

*Радіотраса Hwaseong–Harbin.* Радіостанція, що працює на частоті  $6.015$  МГц, знаходиться в Республіці Корея. При цьому  $R \approx 950$  км. Радіостанція вимикалась з 00:00 до 03:30.

В денний час в усі дні  $f_D \approx 0$  Гц,  $A \approx -45$  дБВ (рис. 5.6). В вечірній час ДЗЧ поступово зменшувалося від  $0$  Гц до  $-(0.3\text{--}0.4)$  Гц. ДС дещо розширювались.

В нічний час протягом усіх днів варіації ДЗЧ були значними:  $f_{Da} \approx 0.2\text{--}0.4$  Гц. Зазвичай ДЗЧ змінювалось квазіперіодично з  $T \approx 20\text{--}80$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1\text{--}0.3$  Гц відповідно. Найбільші варіації ДЗЧ спостерігались 7, 8, 9, 11 і 12 жовтня 2019 р. 12 жовтня 2019 р. також реєструвались коливання з  $T \approx 15$  хв і  $f_{Da} \approx 0.05\text{--}0.10$  Гц.

Найменші варіації ДЗЧ ( $\sim 0.1\text{--}0.2$  Гц) відзначались 13 жовтня 2019 р.

Найбільші варіації  $A(t)$  (до  $30$  дБВ) у нічний час мали місце 10 і 11 жовтня

2019 р.

*Радіотраса Chiba/Nagara–Harbin.* Радіопередавальний пристрій, який функціонує на частоті 6.055 МГц, дислокований на території Японії. При цьому  $R \approx 1610$  км. Пристрій, зазвичай, вимикався з 15:00 до 22:00.

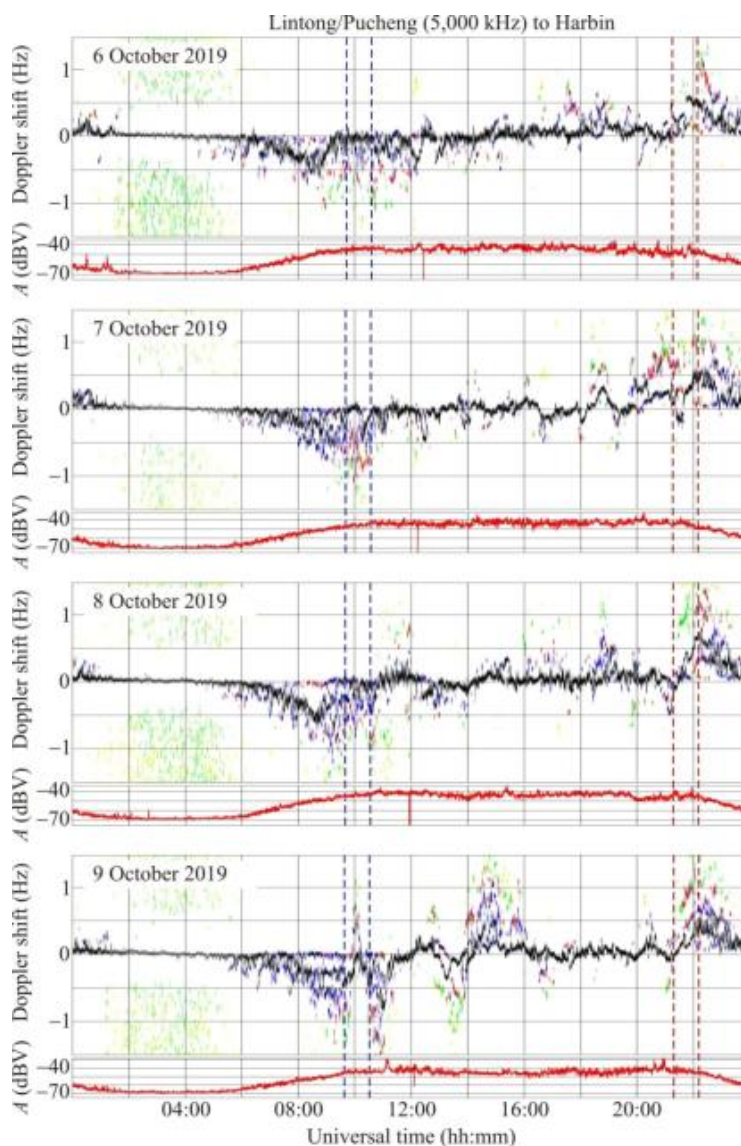


Рис. 5.5 Варіації доплерівських спектрів та амплітуд сигналів в функції всесвітнього часу уздовж радіотраси Lintong–Harbin за 6–13 жовтня 2019 р. Частота радіохвиль становить 5000 кГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 та 0.2 у відносному масштабі відповідно. Діаграма доплерівського зміщення складається зі 117600 точок на кожному 1-годинному інтервалі. Пунктирними лініями вказані заходи та сходи Сонця на висоті 0 і 100 км. Амплітуда сигналу  $A$  на виході приймача в децибелах відносно 1 В показана під доплерівським спектром на кожній панелі



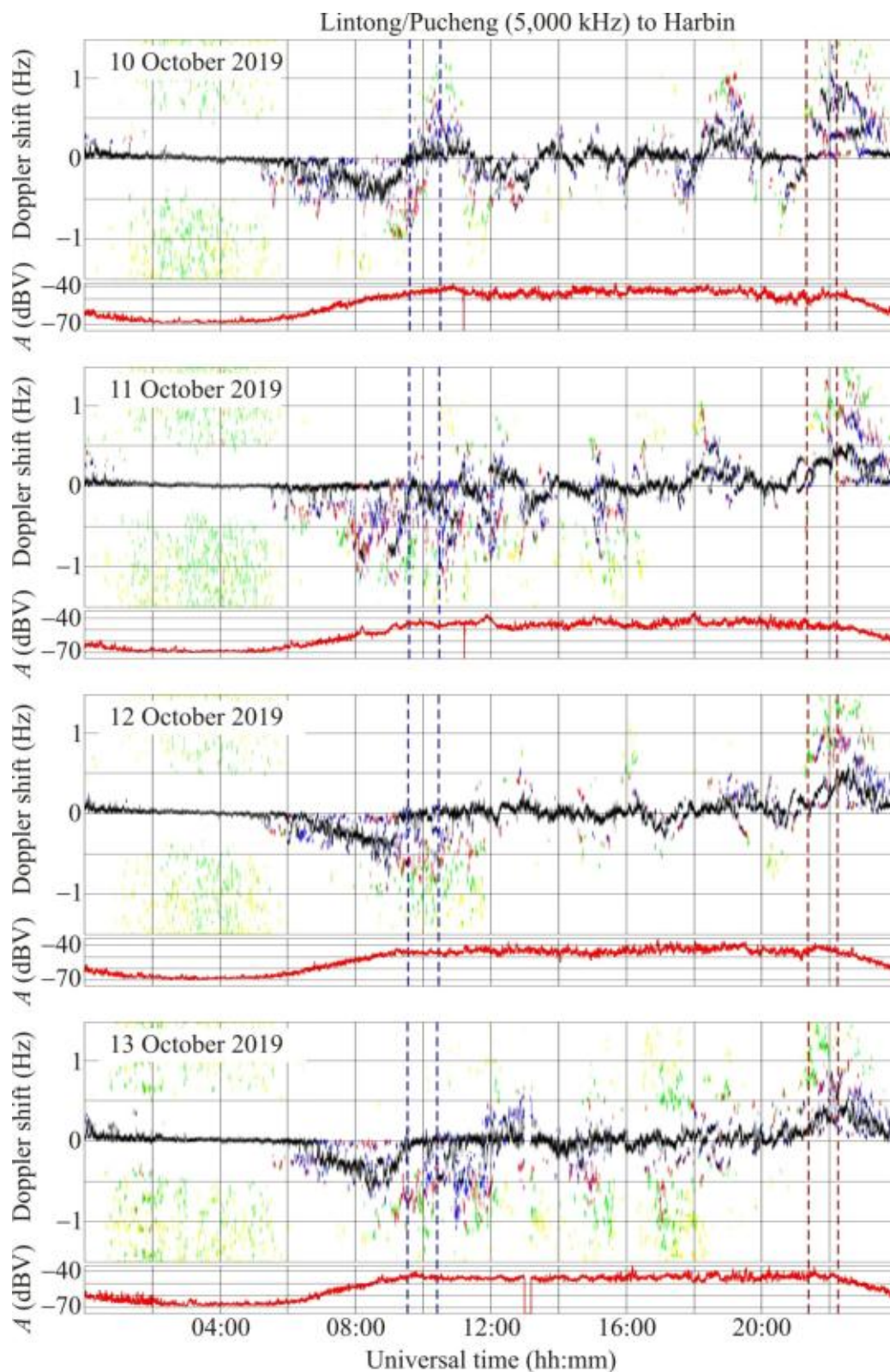


Рис. 5.5 (продовження)

В денний час з 6 по 13 жовтня 2019 р.  $f_{Da} \approx 0$  Гц,  $A(t) \approx -(60-70)$  дБВ (рис. 5.7). У вечірній час ДЗЧ, флуктуюючи, поступово зменшувалося від 0 Гц до  $-(0.5-0.6)$  Гц, а  $A(t)$  при цьому збільшувалась від  $-70$  дБВ до  $-40$  дБВ. У періоди руху

сонячного термінатора ДС розширювався, а ДЗЧ значно змінювалося. У нічний час 6, 10, 12 і 13 жовтня 2019 р. варіації ДЗЧ були відносно невеликі до 0.1–0.2 Гц.

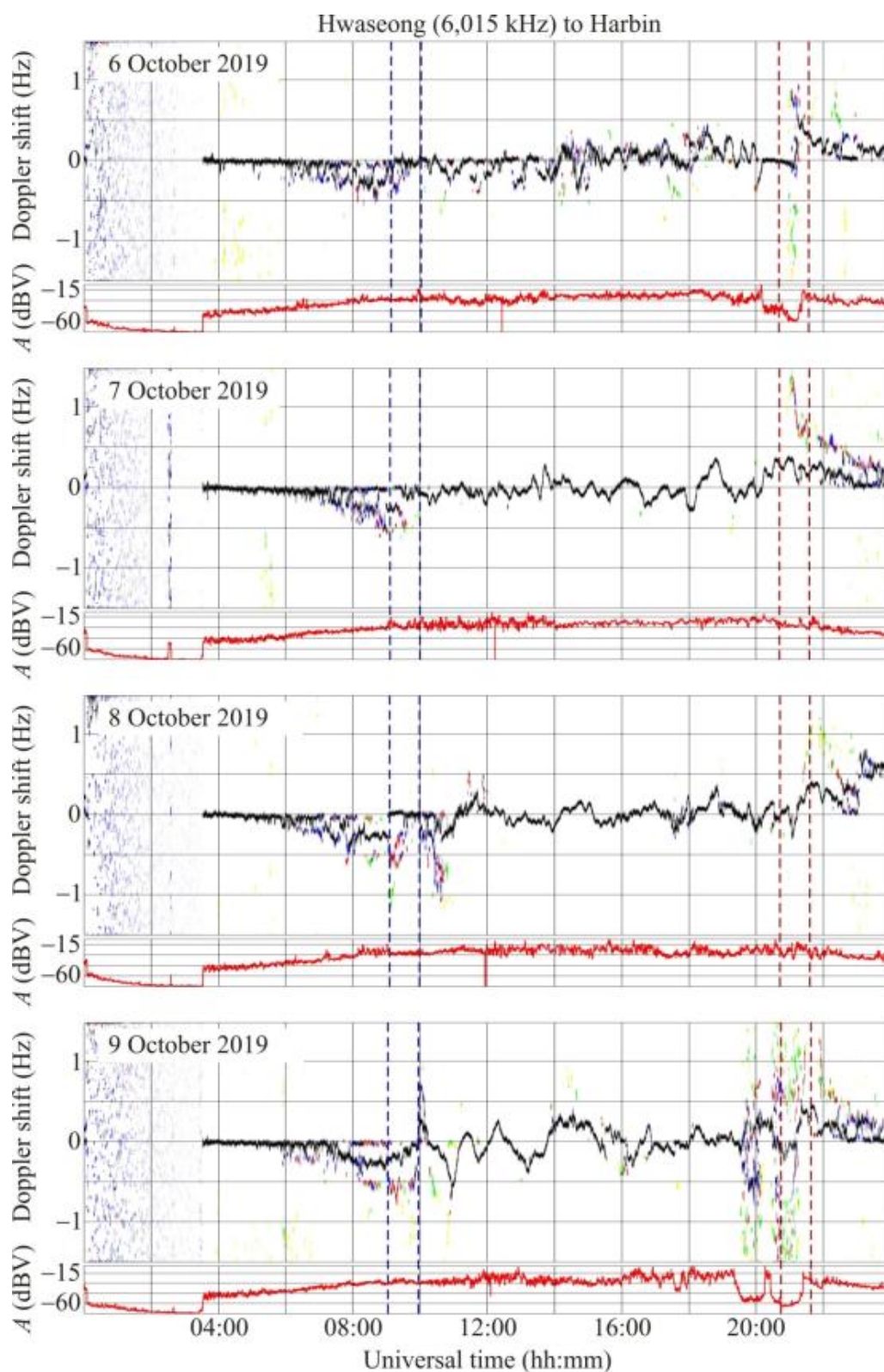


Рис. 5.6 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Hwaseong–Harbin на частоті 6015 кГц



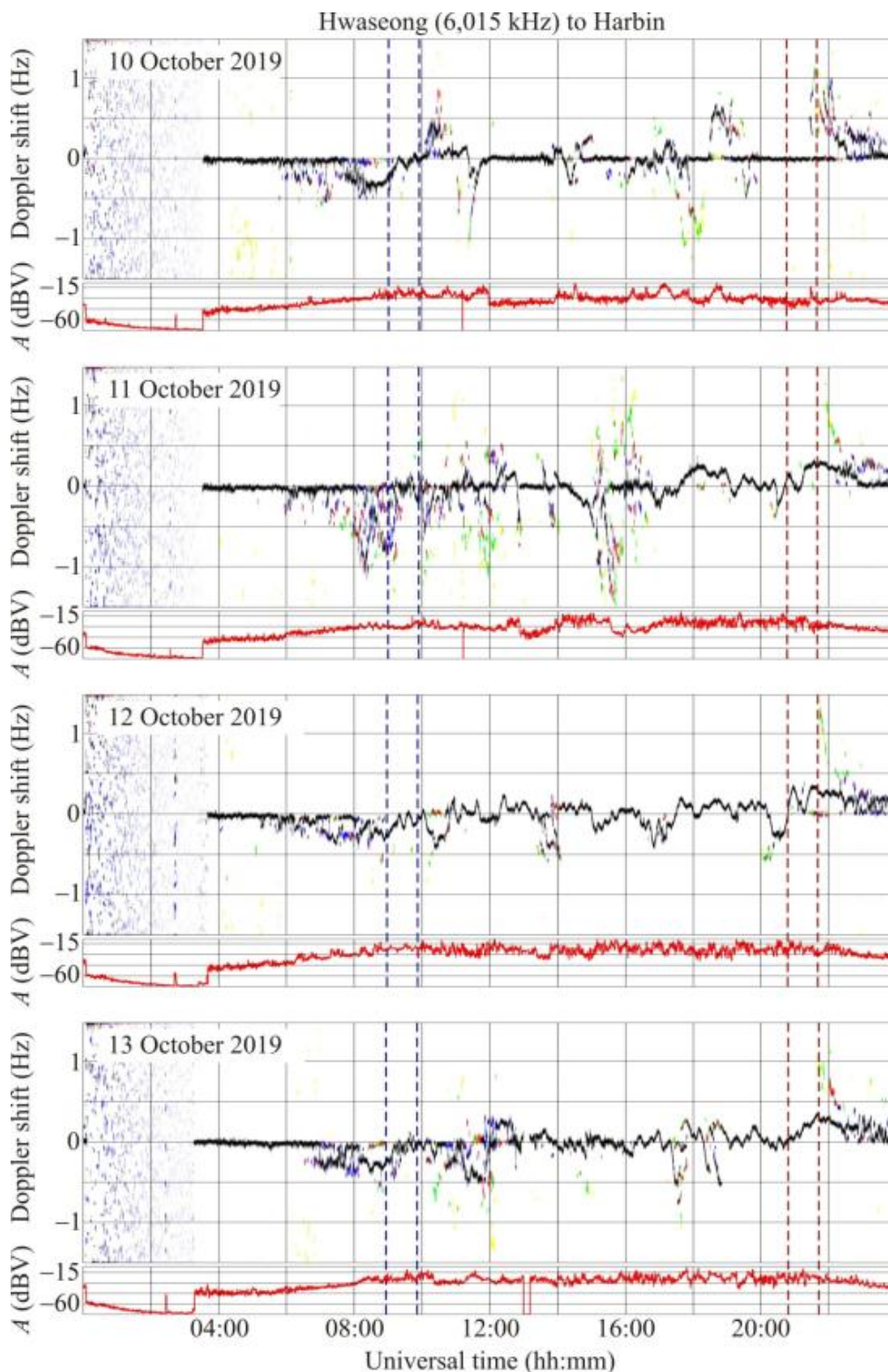


Рис. 5.6 (продовження)

Найбільші зміни ДЗЧ спостерігались 8, 9 і 11 жовтня 2019 р. Наприклад, 8 жовтня 2019 р. ДЗЧ варіювалося від  $-0.7$  Гц до  $0.7$  Гц, ДС розширювалися від  $-1.2$  Гц до  $0.5 - 0.7$  Гц, а варіації  $A(t)$  досягали 10 дБВ. Варіації ДЗЧ були

квазіперіодичними з  $T \approx 20\text{--}120$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1\text{--}0.6$  Гц. 9 жовтня 2019 р. близько 10:50 ДЗЧ зменшилось до  $-1.2$  Гц, а потім в 11:15 збільшилось до  $0.3$  Гц, варіації  $A(t)$  не перевищували 6 дБВ.

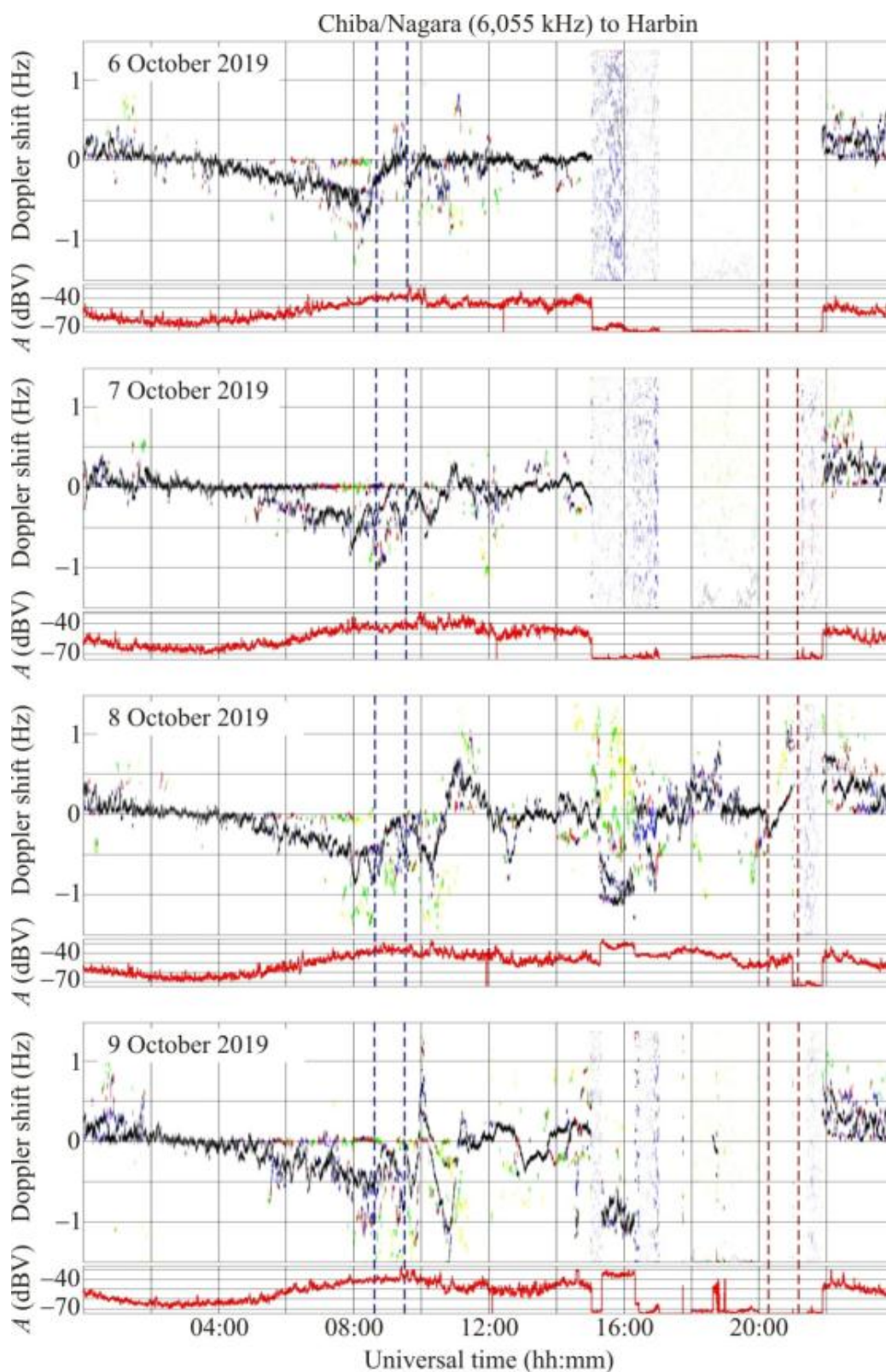


Рис. 5.7 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Chiba/Nagara–Harbin на частоті 6055 кГц

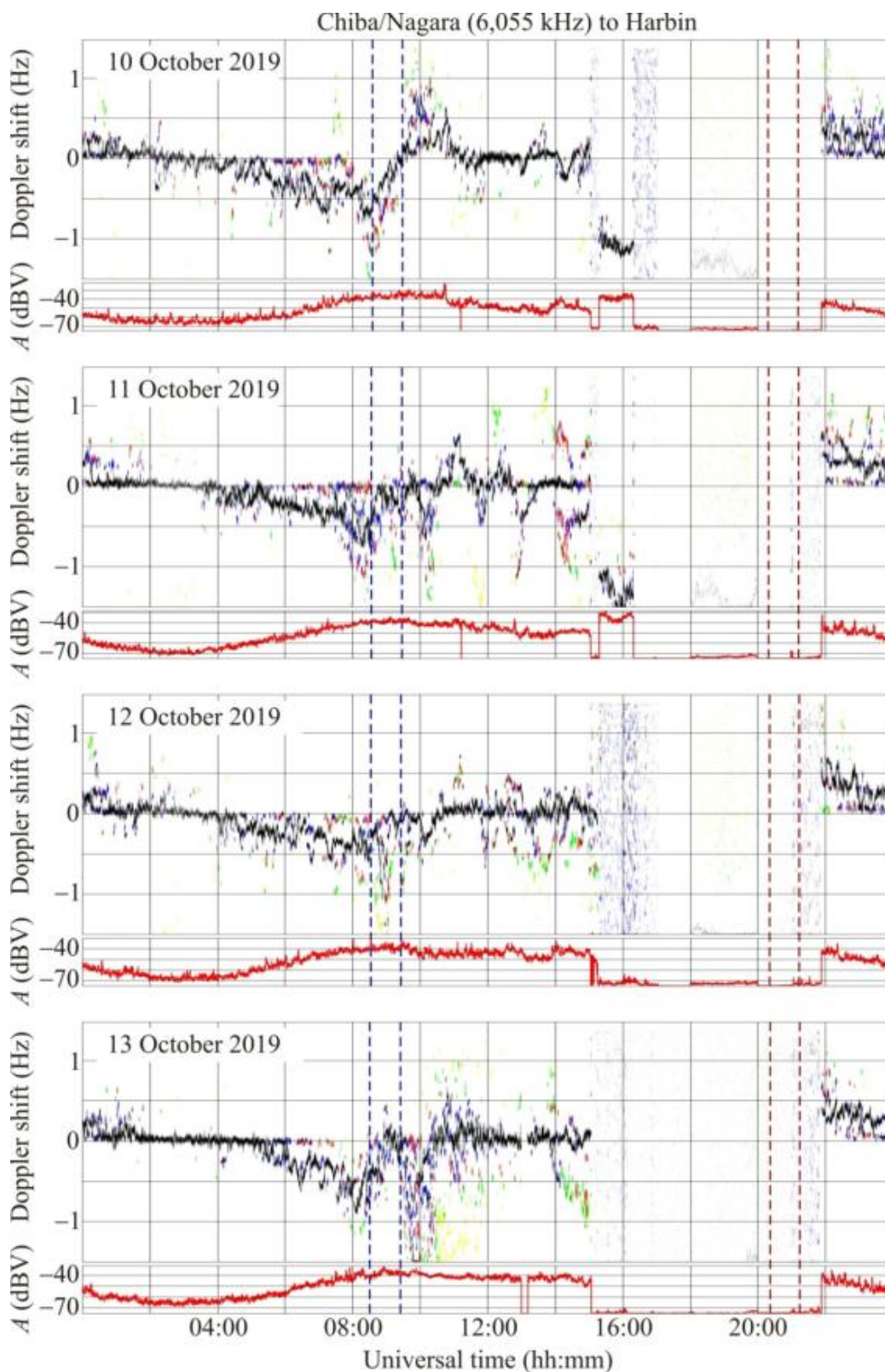


Рис. 5.7 (продовження)

*Радіотраса Beijing–Harbin.* Радіостанція, що випромінює на частоті 6.175 МГц, знаходиться в КНР. При цьому  $R \approx 1050$  км. Радіостанція вимикалась з 00:00 до 09:00 і з 18:00 до 20:00.



Протягом усіх днів розширення ДС було незначним (рис. 5.8). В спокійні дні 6 і 13 жовтня 2019 р. спостерігались квазіперіодичні зміни ДЗЧ з  $T \approx 20\text{--}40$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1\text{--}0.2$  Гц. Найбільші варіації (від  $-0.7$  Гц до  $0.3$  Гц) мали місце 9 жовтня 2019 р. При цьому  $T \approx 80$  хв і  $f_{Da} \approx 0.5$  Гц. В цей день також спостерігались коливання з  $T \approx 20$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. В інші дні 7, 8, 10, 11 і 12 жовтня 2019 р. зміни ДЗЧ зазвичай знаходились в межах  $\pm(0.2 - 0.3)$  Гц. При цьому  $T \approx 20 - 80$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1 - 0.2$  Гц. Варіації  $A(t)$  були незначними.

*Радіотраса Ulaanbaatar–Harbin.* Радіопередавальний пристрій, що працює на частоті 7.260 МГц, розміщено на території Монголії. При цьому  $R \approx 1496$  км. Ця радіотраса одна з найбільш віддалених від місця знаходження супертайфуну Hagibis. Пристрій не випромінював з 05:00 до 07:00 і з 18:00 до 20:30.

У ранковий час ДЗЧ поступово зменшувалося від  $0.8 - 1.2$  Гц до  $0 - 0.2$  Гц (рис. 5.9). Вдень  $f_D \approx 0$  Гц,  $A \approx -60$  дБВ. У вечірній час ДЗЧ зменшувалося до  $-(0.2\text{--}0.5)$  Гц. Найменші варіації ДЗЧ (біля  $0.1\text{--}0.2$  Гц) відзначались 7, 8, 11 і 13 жовтня 2019 р. Найбільші (від  $-0.7$  Гц до  $0.2\text{--}0.3$  Гц) зміни  $f_D$  мали місце 9 і 12 жовтня 2019 р. В інші дні, тобто 6 і 10 жовтня 2019 р. варіації не перевищували  $\pm 0.2$  Гц. Протягом всіх днів спостерігались квазіперіодичні зміни ДЗЧ. Період коливань складав  $20 - 80$  хв, а  $f_{Da} \approx 0.1 - 0.5$  Гц. Варіації амплітуди сигналу були відносно невеликими.

*Радіотраса Yakutsk–Harbin.* Радіостанція, що функціонує на частоті 7.345 МГц, знаходиться на території Росії. При цьому  $R \approx 7350$  км. Радіостанція випромінює з 11:00 до 18:00 і з 20:20 до 24:00. Радіотраса Yakutsk–Harbin – одна з найбільш віддалених від місця знаходження супертайфуну.

6 і 13 жовтня 2019 р. часові варіації ДЗЧ були найменшими (рис. 5.10). Порівняно найбільшими були зміни амплітуди сигналу. Найбільші варіації ДЗЧ (від  $-0.5$  до  $0.4$  Гц) і амплітуди (до  $12\text{--}15$  дБВ) були 11 жовтня 2019 р. Квазіперіод  $T \approx 90\text{--}150$  хв. 7, 8, 9, 10 і 12 жовтня 2019 р. варіації ДЗЧ не перевищували  $0.5$  Гц.

Амплітуда сигналу змінювалась хаотично в межах 10 – 20 дБВ. Період змінювався від 12–15 хв з  $f_{Da} \approx 0.06$  Гц до 100 хв з  $f_{Da} \approx 0.2$  Гц.

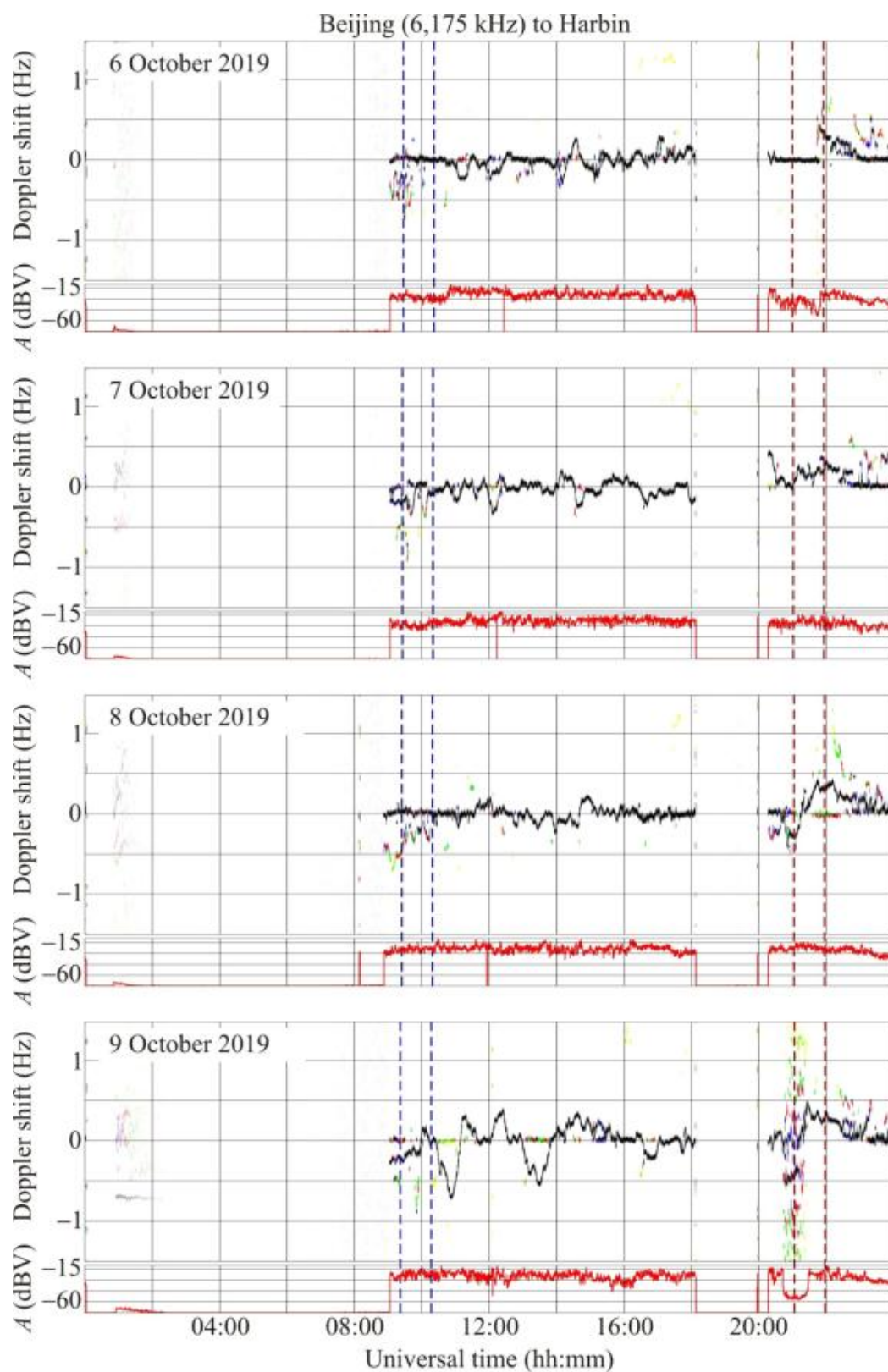


Рис. 5.8 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Beijing–Harbin на 6175 кГц

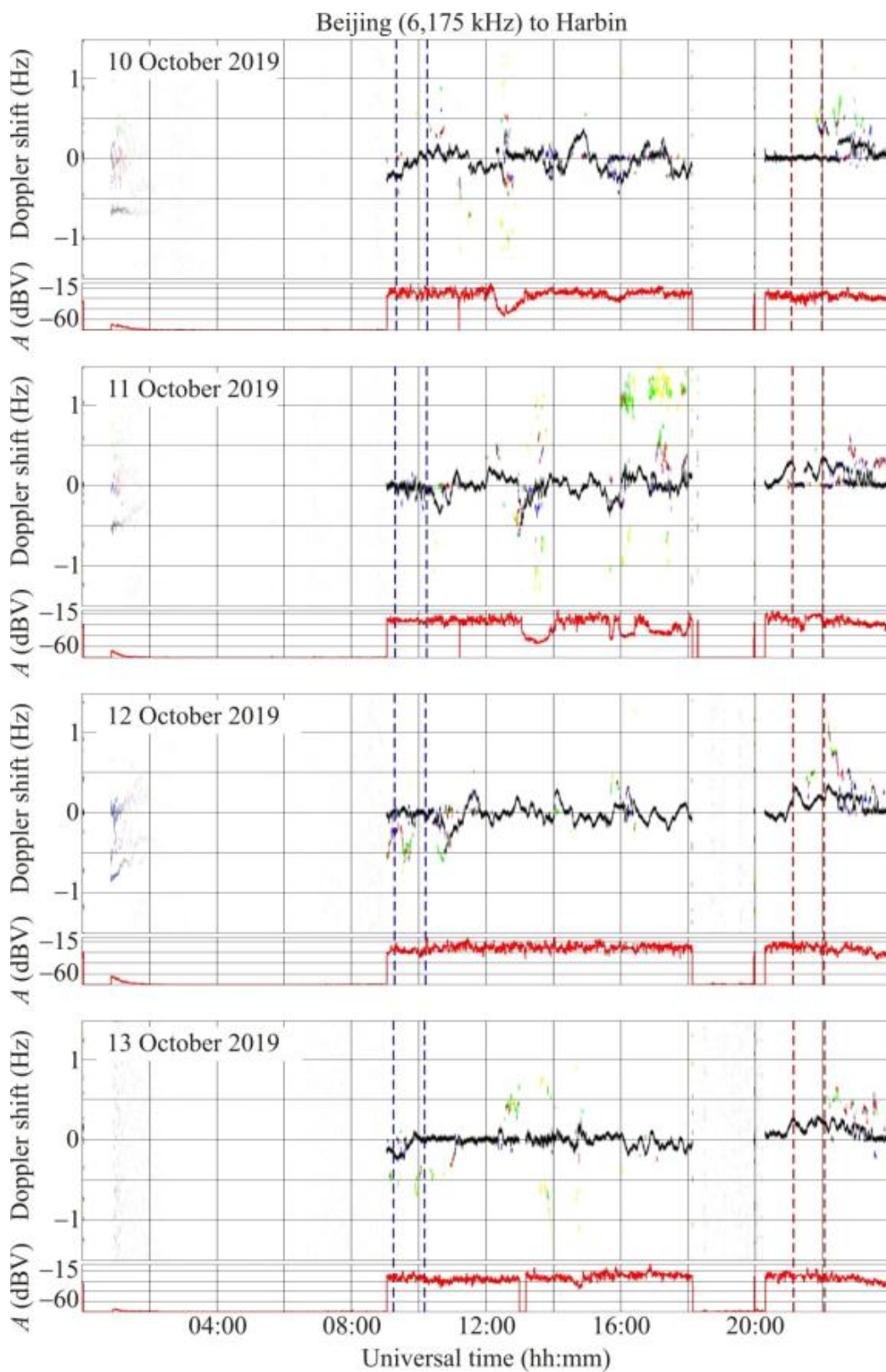


Рис. 5.8 (продовження)

*Радіотраса Shijiazhuang–Harbin.* Радіопередавальний пристрій, що випромінює на частоті 9.5 МГц, розміщено в КНР. При цьому  $R \approx 1310$  км. Пристрій вимикався в різні дні на декілька годин.



6 жовтня 2019 р. в денний і нічний час  $f_D(t) \approx 0$  Гц (рис. 5.11). Лише поблизу термінатора мали місце невеликі ( $\sim 0.2$  Гц) варіації ДЗЧ. Протягом всіх днів

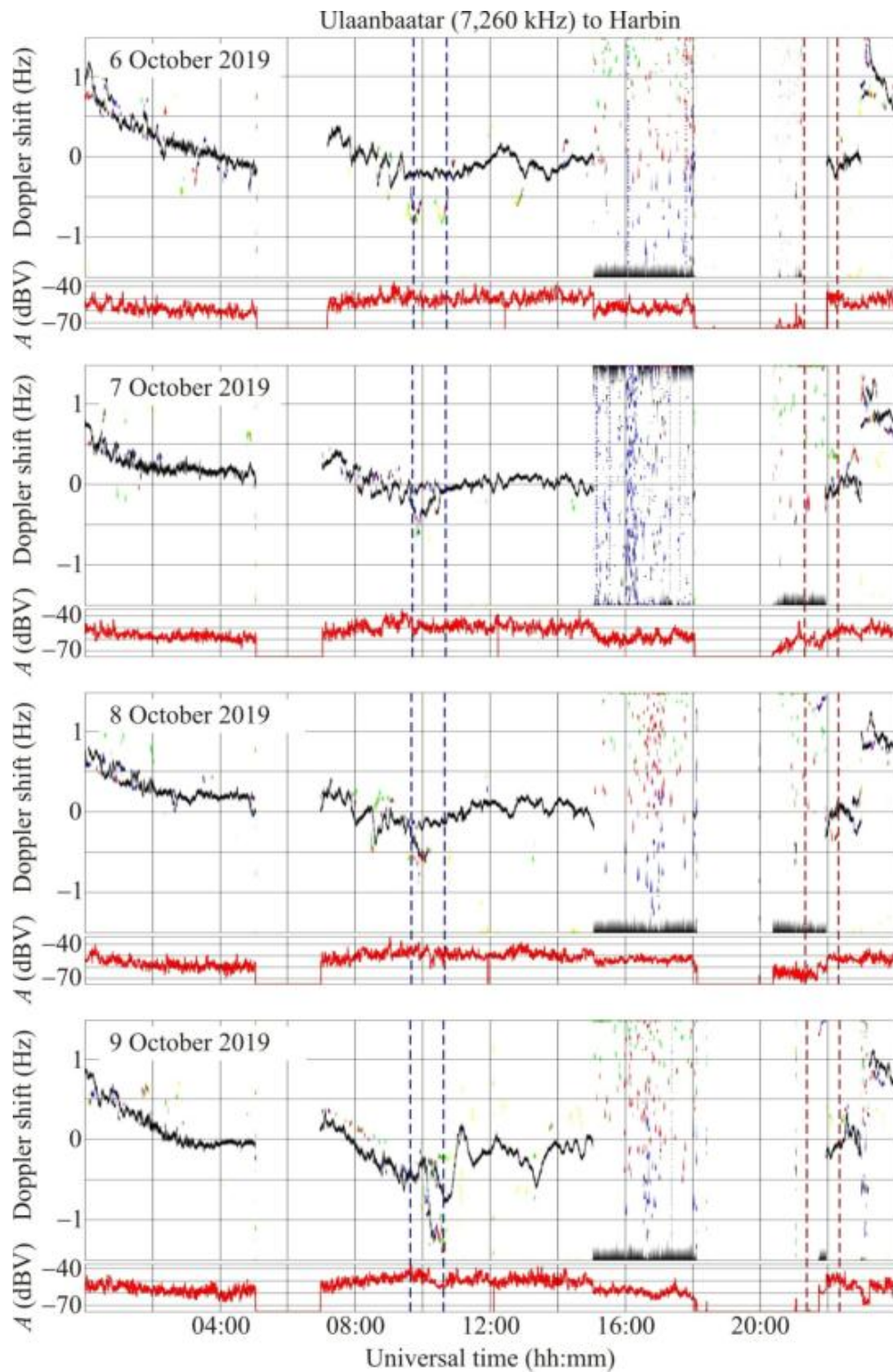


Рис. 5.9 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Ulaanbaatar–Harbin на частоті 7260 кГц

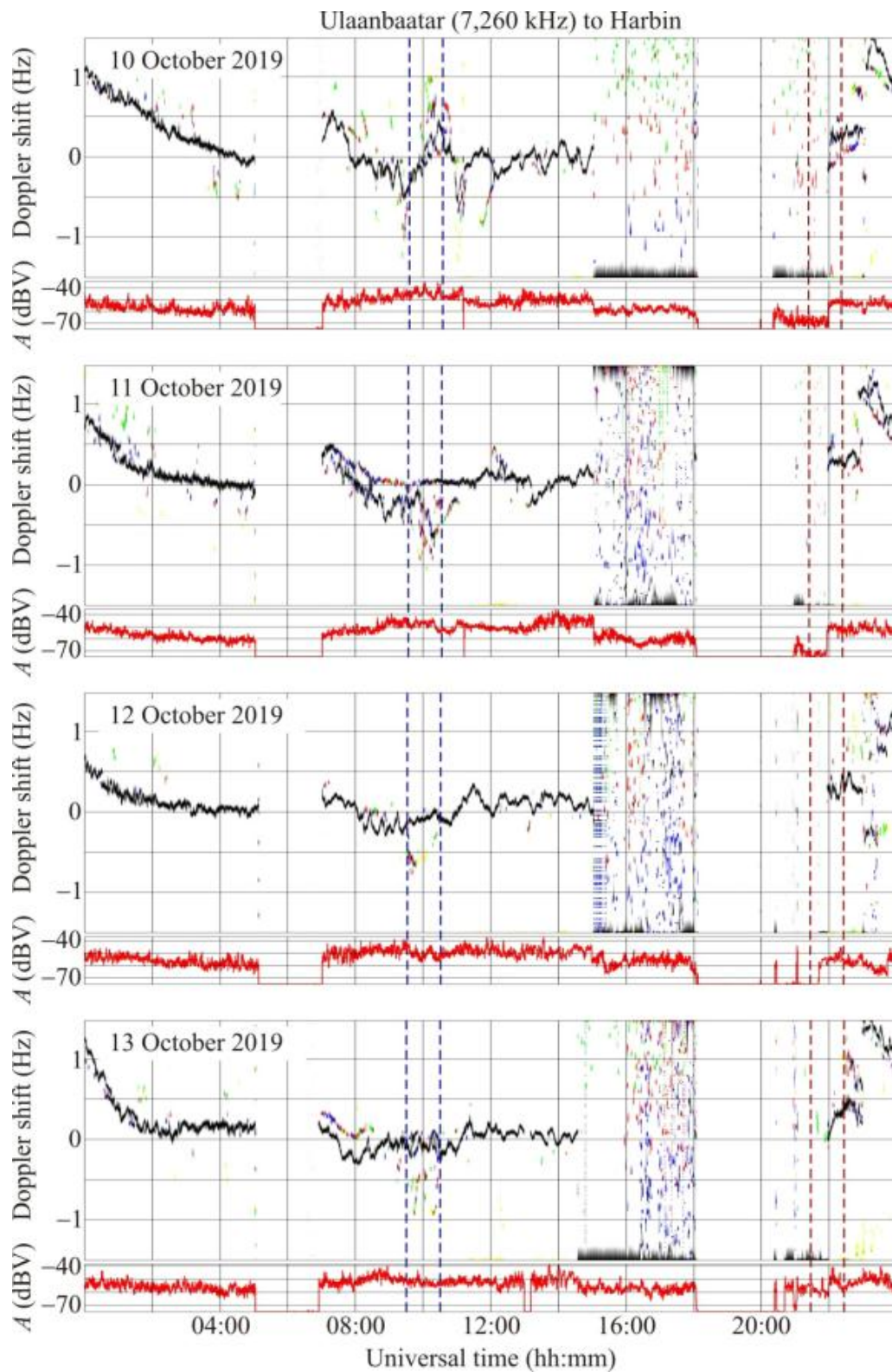


Рис. 5.9 (продовження)

спостерігались значні (до 30 дБВ) випадкові варіації амплітуди сигналу. Це позначилося на змінах ДЗЧ. 12 жовтня 2019 р. в нічний час варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з  $T \approx 60$  хв і  $f_{Da} \approx 0.2$  Гц.

*Радіотраса Yamata–Harbin.* Радіостанція, що працює на частоті 9.75 МГц, знаходиться в Японії. При цьому  $R \approx 1570$  км. Станція вимикалась з 16:00 до 22:00. З 08:00 до 16:00 її несуча частота зміщувалась на 0.5 Гц.

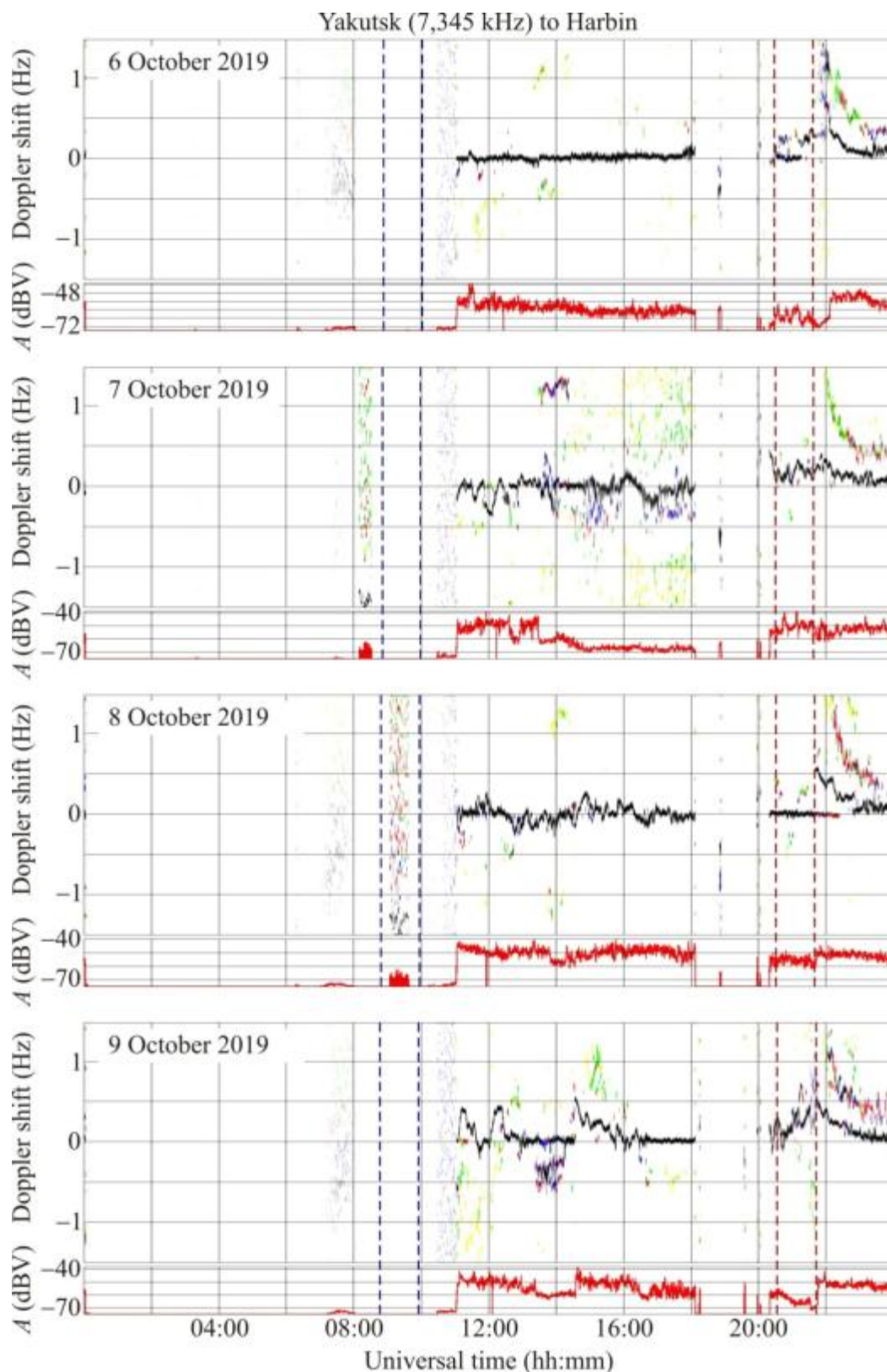


Рис. 5.10 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Yakutsk–Harbin на частоті 7345 кГц



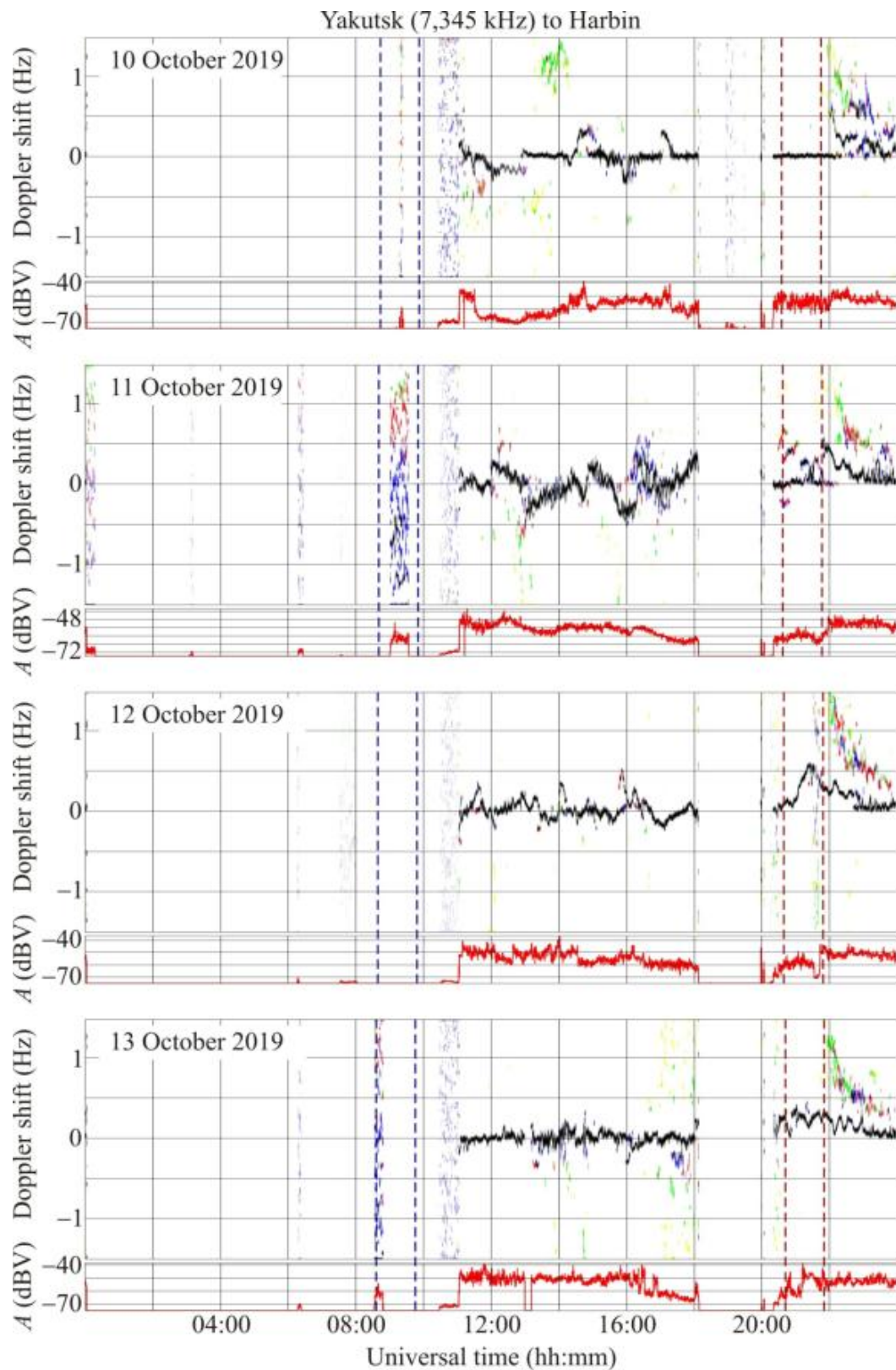


Рис. 5.10 (продовження)

6 і 13 жовтня 2019 р. варіації ДС і ДЗЧ були незначними (рис. 5.12). Протягом всіх днів в денний час варіації ДЗЧ були малопомітними. В нічний час 8 і 9 жовтня 2019 р. ДЗЧ змінювався від  $-0.5$  Гц до  $0.5$  Гц. 7, 10, 11 і 12 жовтня

2019 р. ДЗЧ зазвичай не перевищувало  $\pm 0.2$  Гц та мало період 15–20 хв. Протягом усіх днів випадкові варіації  $A(t)$  були значними.

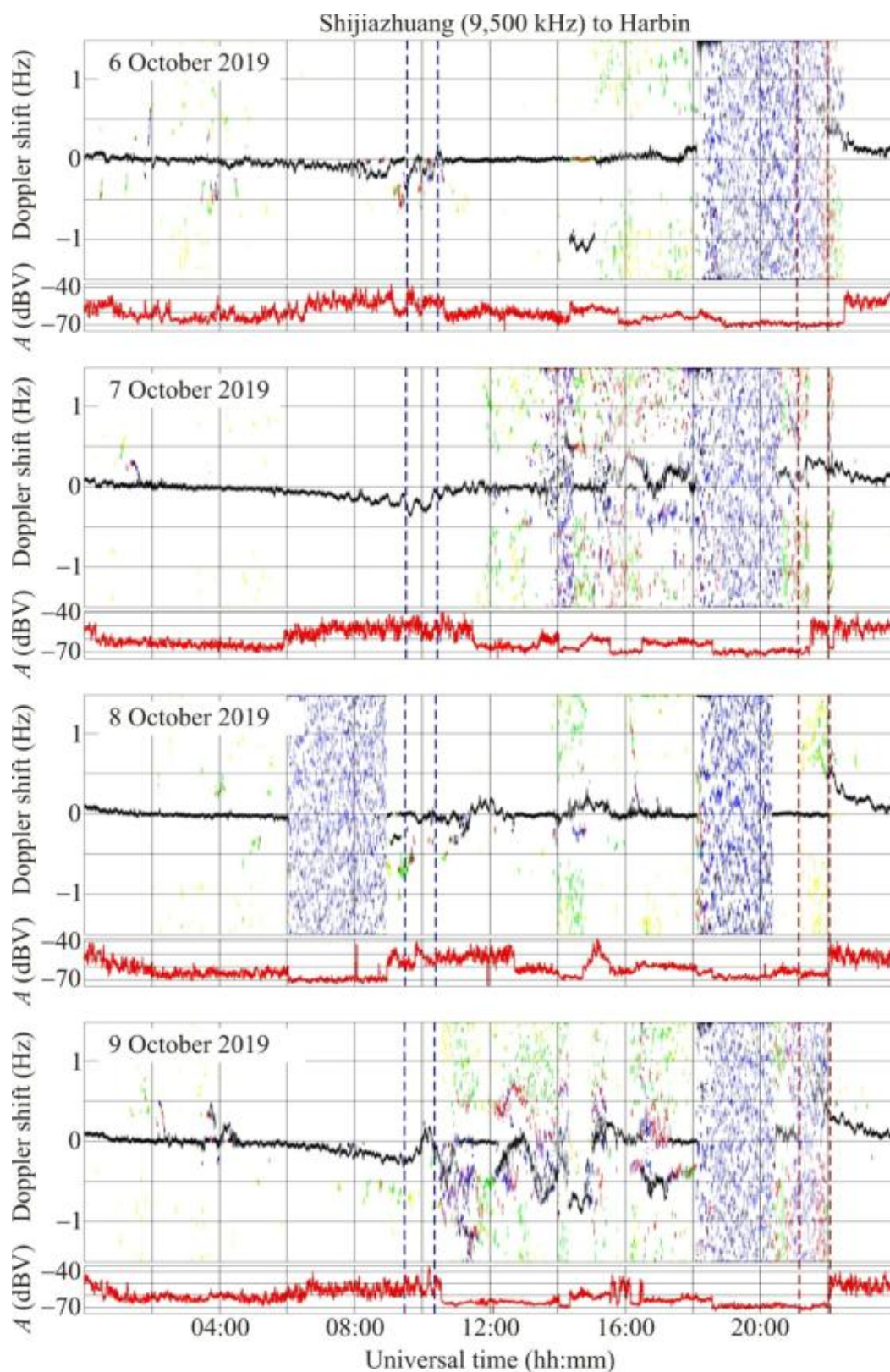


Рис. 5.11 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Shijiazhuang–Harbin на 9500 кГц



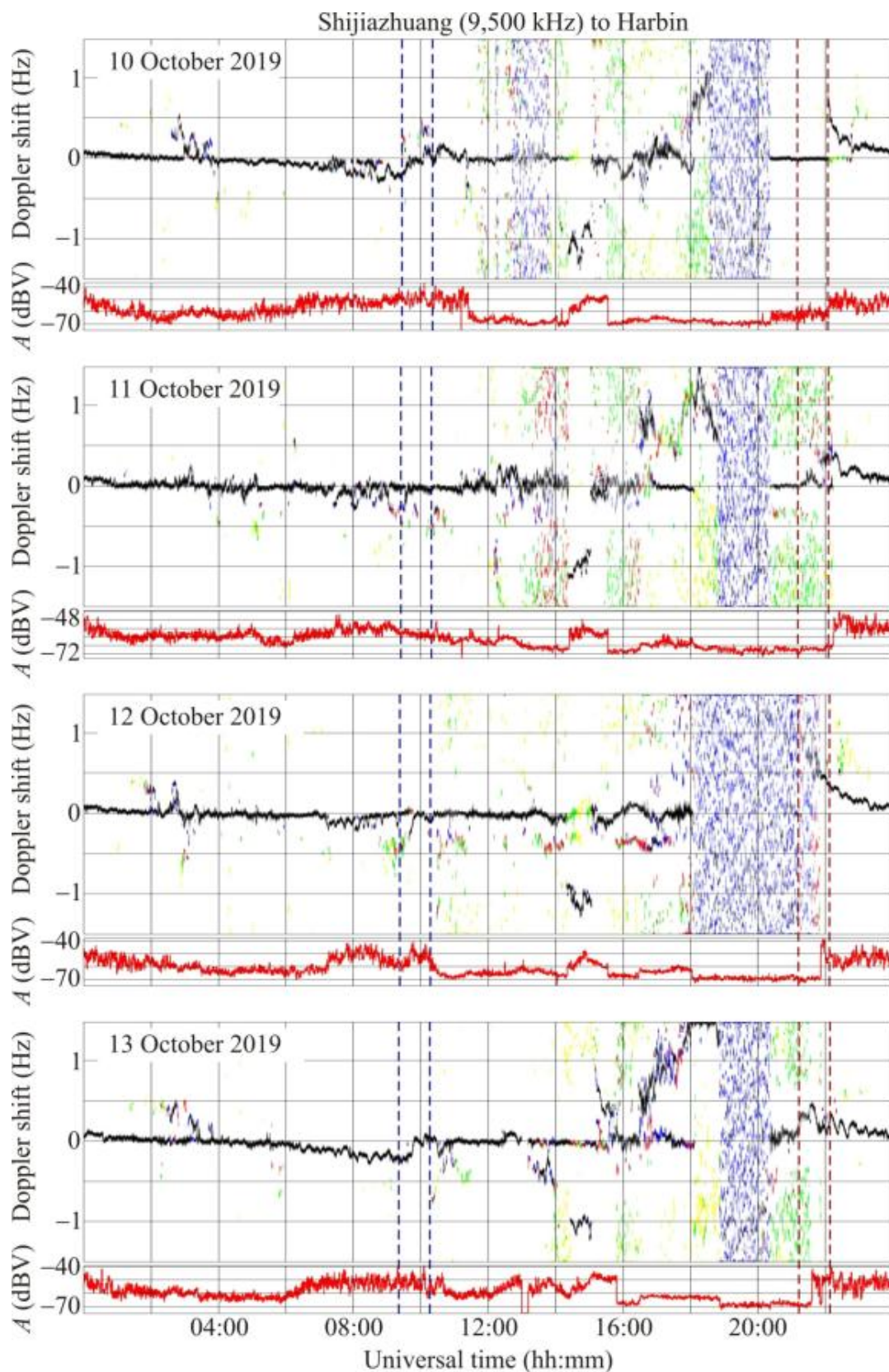


Рис. 5.11 (продовження)

### 5.2.5 Аналіз результатів спостережень

Для того, щоб можна було впевнено виявити ефекти, викликані тайфуном,

і вилучити можливий вплив зверху, був проведений всебічний аналіз стану

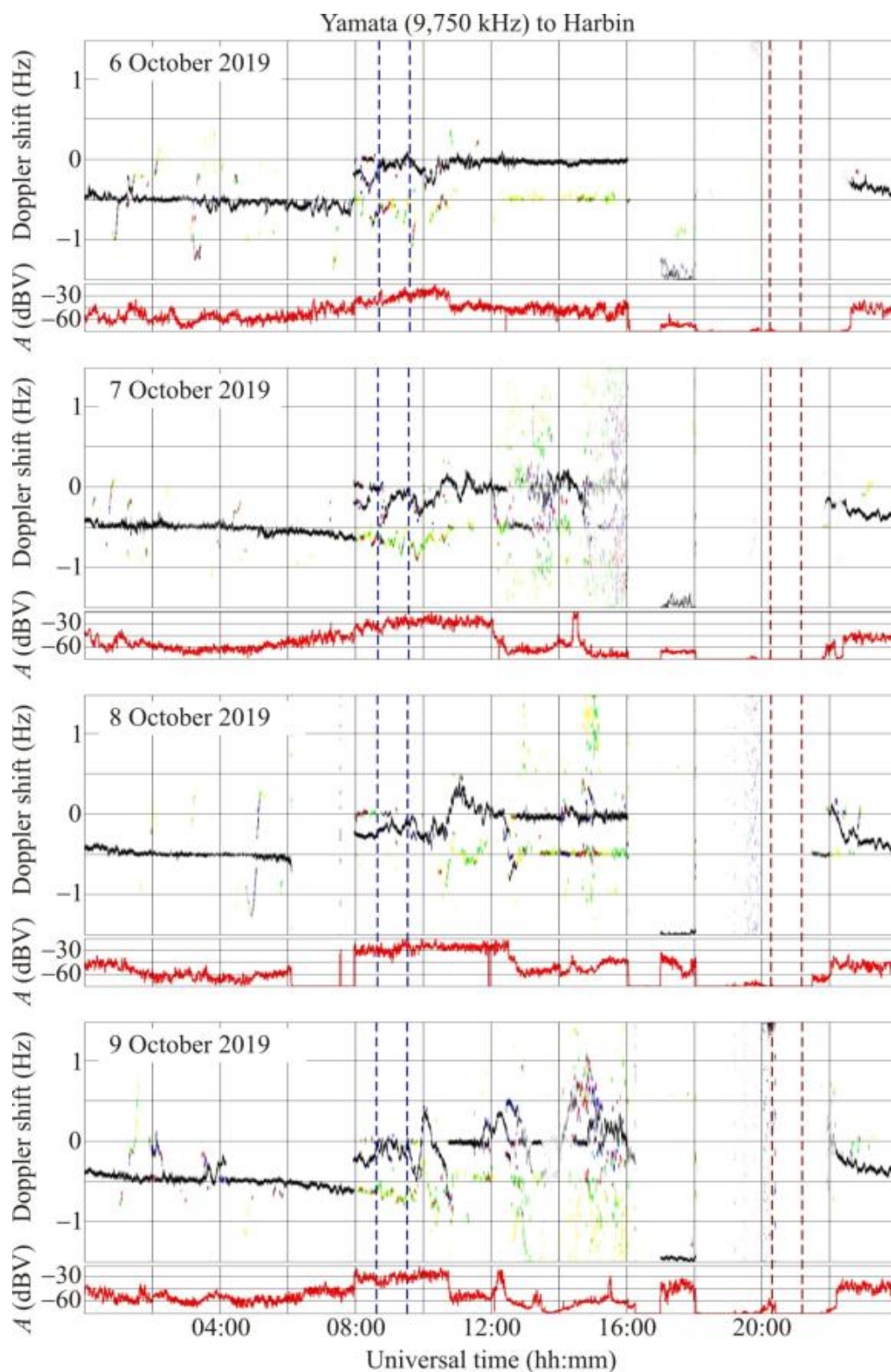


Рис. 5.12 Як на рис. 5.5, але для радіотраси Yamata–Harbin на 9750 кГц

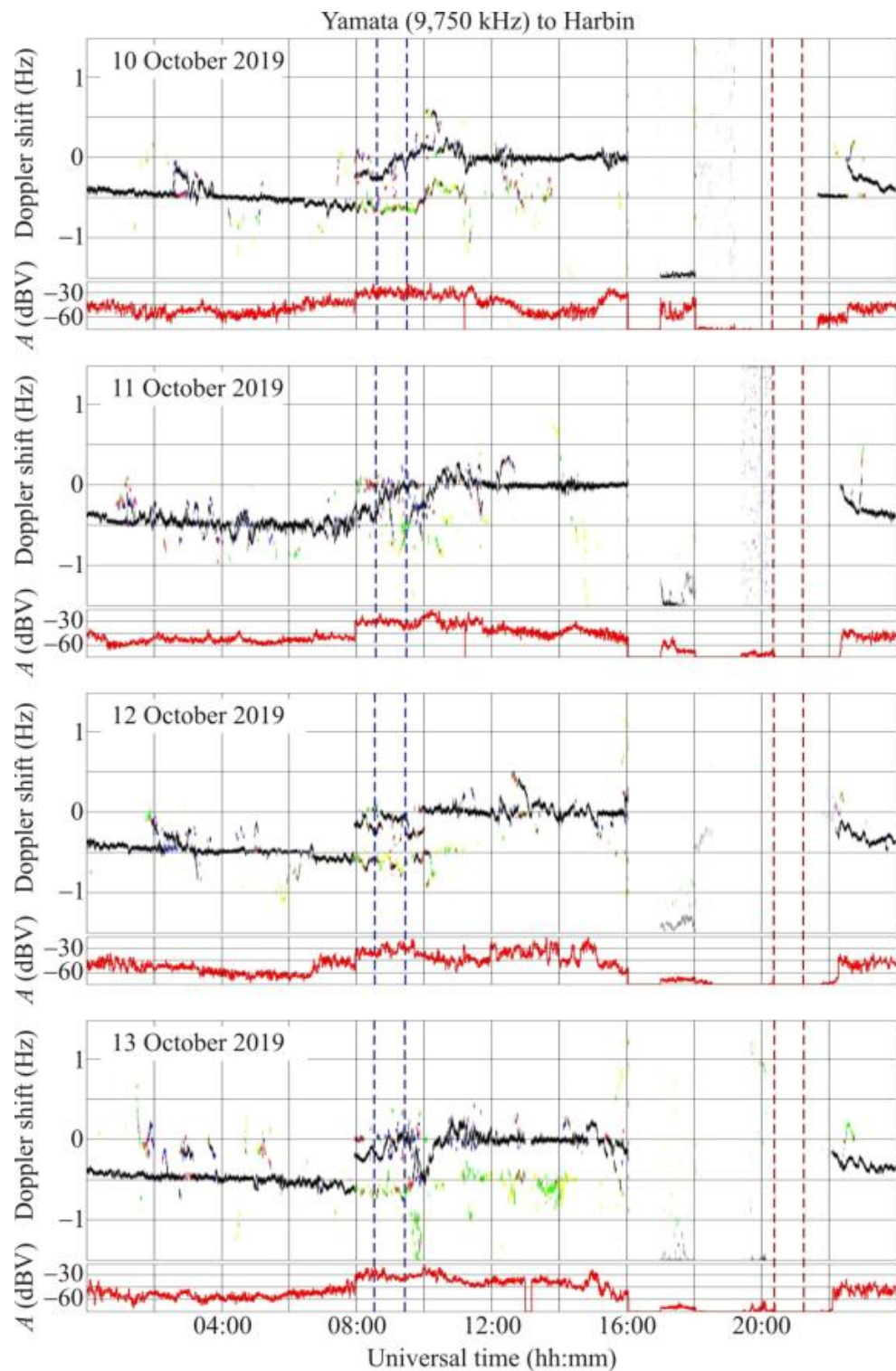


Рис. 5.12 (продовження)

космічної погоди, що включає параметри сонячного вітру, міжпланетне магнітне поле, параметр Акасофу  $\epsilon_A$  та геомагнітні індекси. Самі зміни в космічній погоді, пов'язані з процесами, що протікають на Сонці, та їх наслідки, геокосмічні бурі, можуть ускладнити виявлення реакції іоносфери на дію тайфуну. Виявилось, що



параметри, перераховані вище, відповідають незбуреним умовам у космічній погоді, які були сприятливими для виявлення проявів тайфуну в іоносфері.

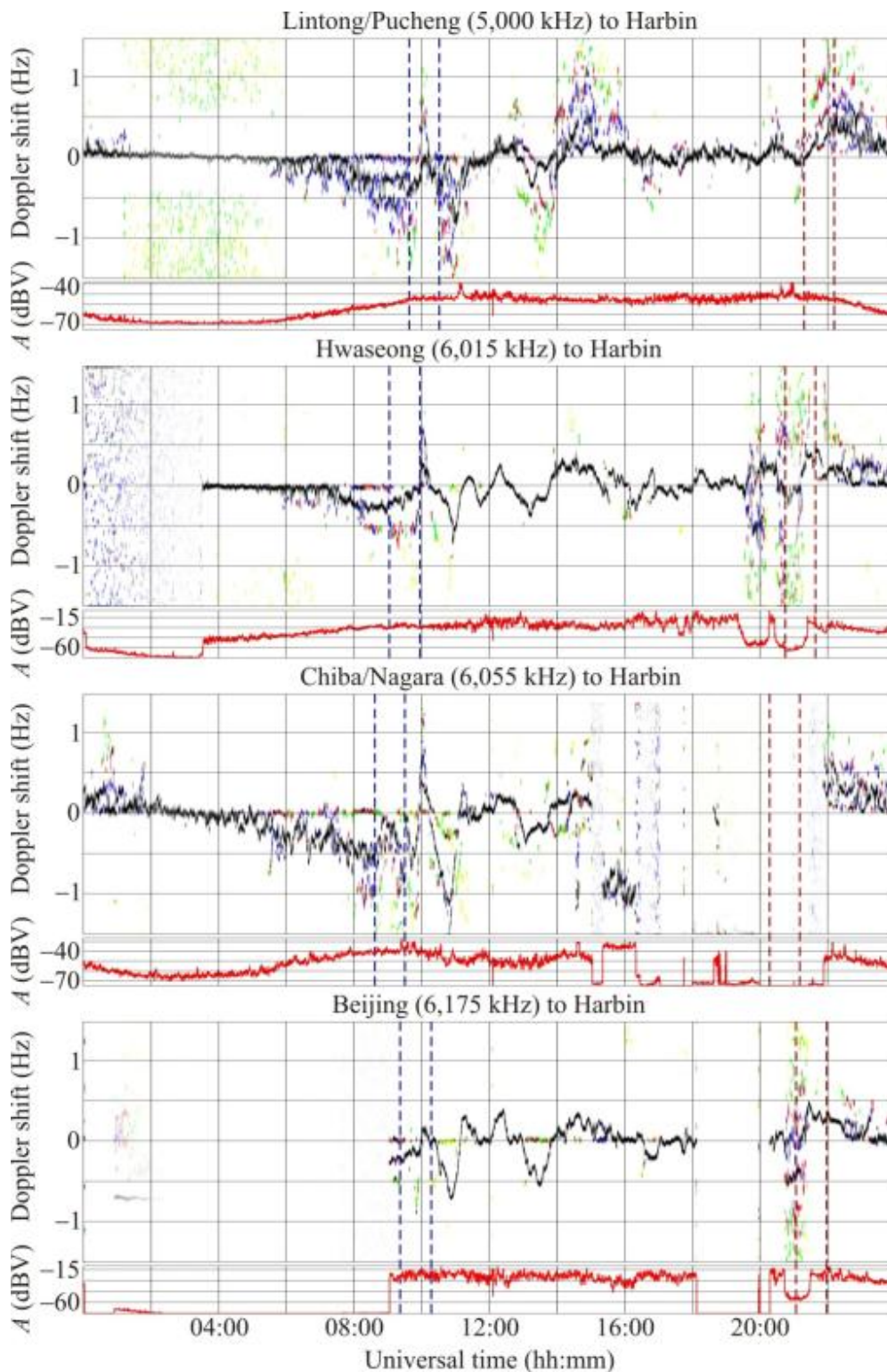


Рис. 5.13 Часові варіації доплерівських спектрів на різних радіотрасах 9 жовтня 2019 р.

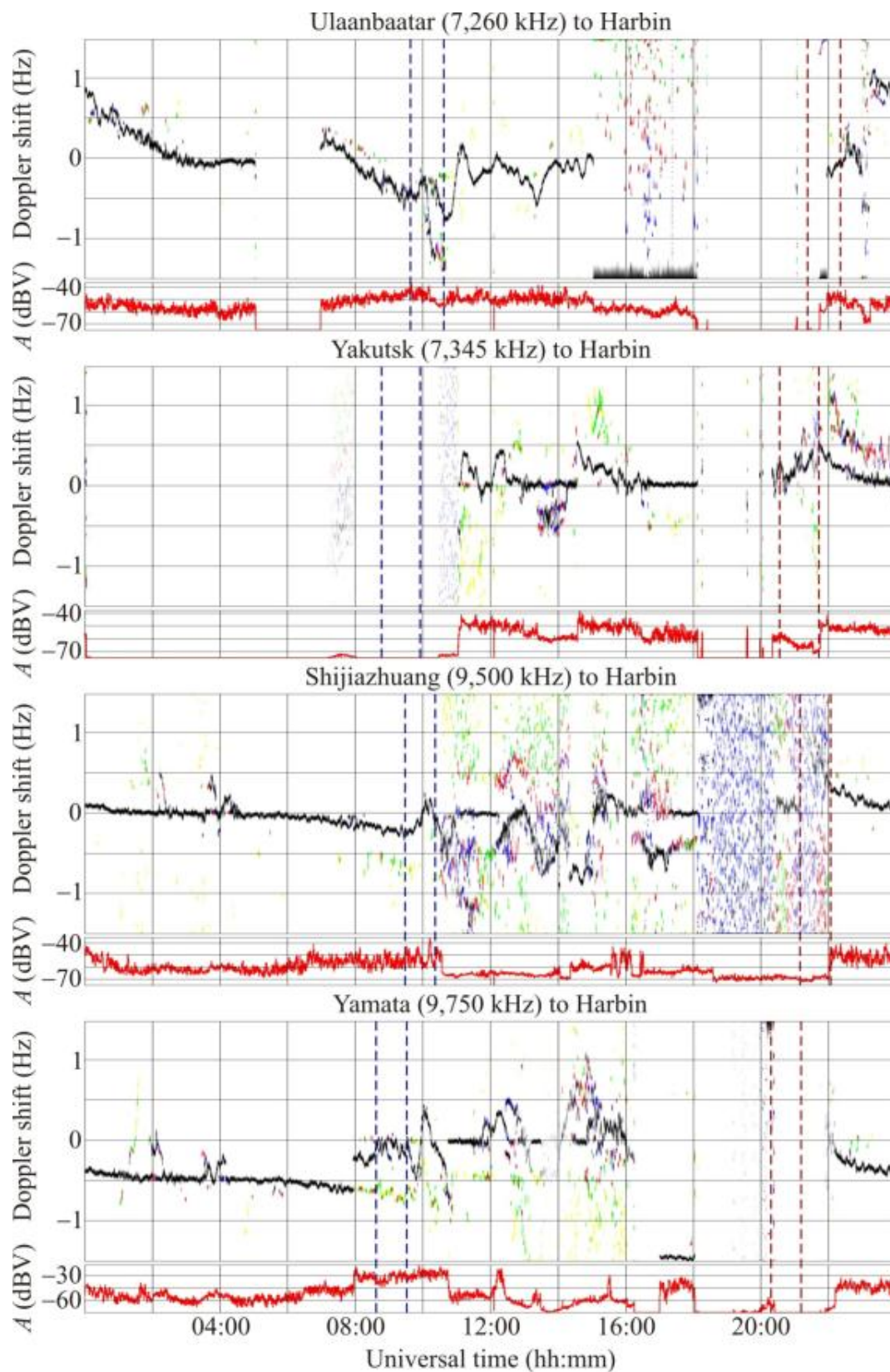


Рис. 5.13 (продовження)

Супертайфун Hagibis ближче за все підійшов до Японії та радіотрас зондування 12 і 13 жовтня 2019 р. Однак, до цього часу сила супертайфуну значно

зменшилась: дефіцит тиску не перевищував 20 – 40 гПа, швидкість вітру в ньому складала 90 – 120 км/год або 20 – 33 м/с. З цієї причини супертайфун не міг істотно вплинути на іоносферу.

Найбільші варіації ДС на всіх радіотрасах спостерігались 9 жовтня 2019 р. В сусідні дні 8 і 10 жовтня 2019 р. вони були дещо менше. Протягом 8–10 жовтня 2019 р. супертайфун мав найбільшу енергетику: дефіцит тиску складав біля 95 гПа, а швидкість вітру – 250–260 км/год або 69–72 м/с. Відстань від супертайфуну 9 жовтня 2019 р. до середини радіотрас складала ~2500–3000 км.

Важливо, що подібні варіації у контрольні дні 6, 7, 11, 12 та 13 жовтня 2019 р. відсутні або були значно меншими, ніж 8 або 10 жовтня 2019 р., а особливо 9 жовтня 2019 р.

Слід зазначити, що хвильові збурення можуть виникати і без тайфунів, що можна побачити у спостереженнях, зроблених у контрольні дні та представлених у цій роботі. Тайфуни, як правило, діють так, що посилюють хвильову активність, і це також видно з даних, усереднених за 28 контрольних днів жовтня 2019 р., коли оцінка доплерівського зміщення частоти дорівнює  $0.21 \pm 0.02$  Гц проти  $0.53 \pm 0.04$  Гц 9 жовтня 2019.

Щоб це було зрозуміло, часові варіації доплерівських спектрів уздовж різних траєкторій поширення 9 жовтня 2019 р. представлені на рис. 5.13, який показує, що варіації в доплерівських спектрах і в доплерівському зміщенні частоти демонструють суттєві залежності від орієнтації шляху поширення та від частоти радіохвиль. Зокрема, доплерівське зміщення частоти вздовж найвіддаленіших радіотрас, від Ulaanbaatar–Harbin та від Yakutsk–Harbin, суттєво менший, ніж уздовж радіотрас Chiba/Nagara– Harbin, Shijiazhuang– Harbin та Beijing– Harbin.

### 5.2.6 Акустико-гравітаційні хвилі

Атмосферні гравітаційні хвилі з періодом 20–100 хв [130] були запуснені супертайфуном, досягли радіотрас та спричинили коливання, що спостерігаються у доплерівському зміщенні частоти. Іоносферні ефекти супертайфуну спостерігалися на всіх шляхах, переважно в нічний час, коли радіохвилі відбивались на великій висоті, тобто в F-області іоносфери. Дані про періоди узгоджуються зі спостереженнями, описаними в роботах [106, 121].

Оцінки для різних радіотрас і  $T \approx 60\text{--}120$  хв дають  $\delta_{Na} \approx 30\text{--}60\%$ . При  $T \approx 20$  хв  $\delta_{Na} \approx 10\text{--}12\%$ .

### 5.2.7 Інфразвукові хвилі

На додачу до хвиль з періодом 10–150 хв спостерігались також хвилі з періодами  $T \sim 2\text{--}7$  хв; такі хвилі відносяться до низькочастотного інфразвуку. Хвилі з періодами  $T \sim 50\text{--}300$  с спостерігали автори роботи [122].

На рис. 5.14 наведено приклад варіацій доплерівського зміщення частоти в діапазоні періодів 2–7 хв. Дані на рис. 5.14 показують, що доплерівське зміщення частоти 9 жовтня 2019 р. коливався квазіперіодично з періодом  $T \approx \sim 2$  хв і амплітудою  $f_{Da} \approx \sim 3.3 \cdot 10^{-2}$  Гц з 08:00 до 09:00 UT. Таким чином, маємо  $\delta_{Na} \approx 0.23\%$ , в той час як траєкторні розрахунки показують, що радіохвиля відбилася в нижній частині області F.

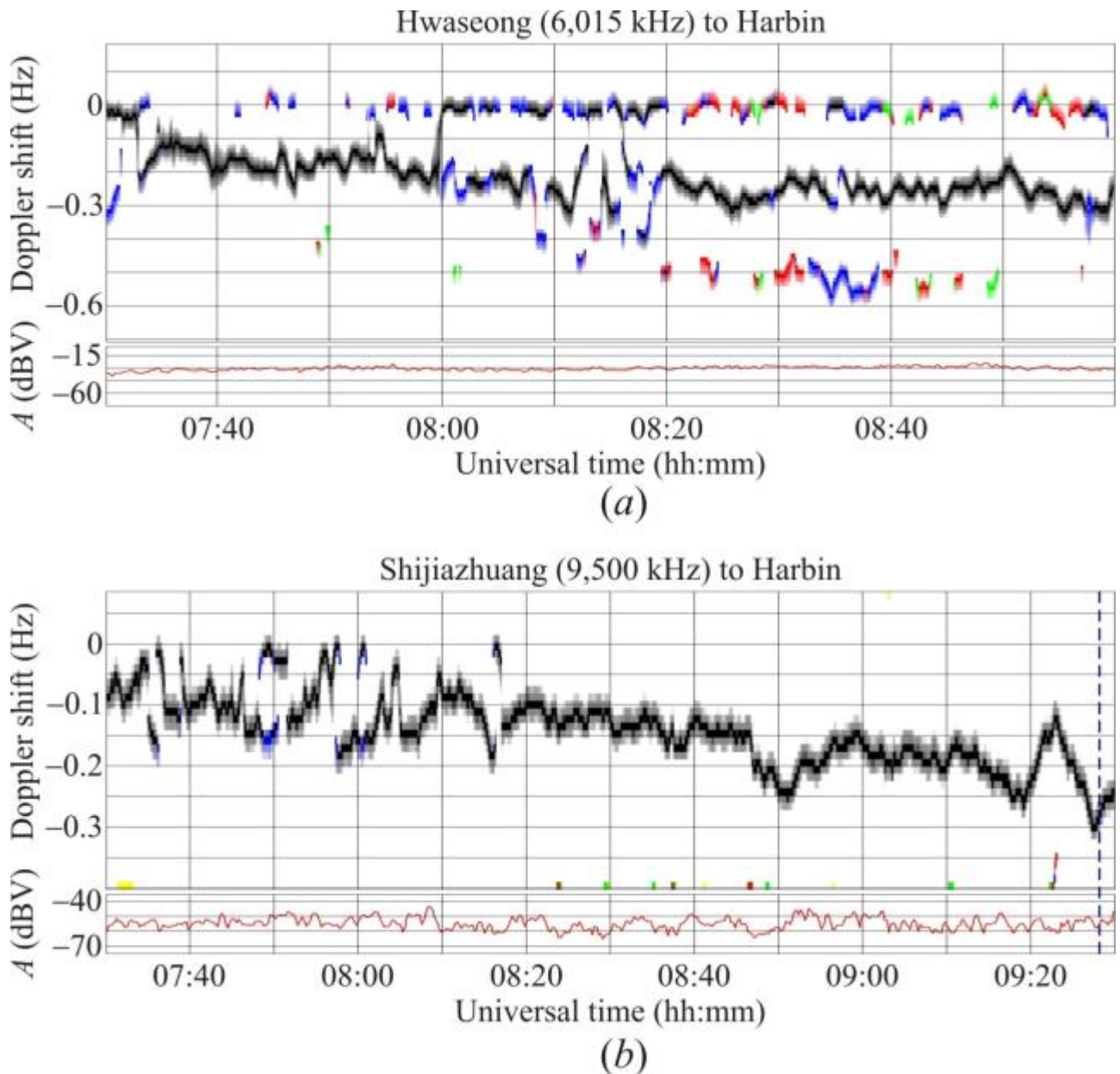


Рис. 5.14 Приклади проявів інфразвукових хвиль у часових варіаціях доплерівське зміщення частоти: вздовж радіотрас (a) Hwaseong–Harbin та (b) Shijiazhuang–Harbin

### Висновки до розділу 5

1. Аналіз стану космічної погоди 7–14 листопада 2019 р. показав, що іоносферні умови були сприятливими для пошуку реакції навколишнього середовища на дію супертайфуну Hagibis.



2. За допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена та досліджена реакція іоносфери на дію супертайфуну Hagibis.

3. Дія супертайфуну супроводжувалась підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувались хвильові процеси з періодом від 2 до 7 хв і від 12–15 до 60–150 хв.

4. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалась за допомогою акустико-гравітаційних хвиль.

5. Найбільший вплив на іоносферу виявлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику (8, 10 і особливо 9 жовтня 2019 р.). При цьому супертайфун знаходився на відстані ~2500 – 3000 км від середини радіотрас похилого зондування.

6. Під дією хвильових процесів 9 жовтня 2019 р. висота відбиття радіохвиль коливалась в межах (від  $\pm 30$ –50 км до  $\pm 60$ –90 км).

7. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів у F-області іоносфери змінювалась від 10 – 12% для періодів ~20 хв до 30 – 60% для періодів ~60 – 120 хв.

8. Виявлено прояви інфразвукових коливань в іоносфері. Період інфразвуку змінювався від 2 до 7 хв, залежно від висоти зондування. Відносна амплітуда квазіперіодичних коливань електронної концентрації коливалась у діапазоні 0.2–0.4%.

## **РОЗДІЛ 6**

### **ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ГЕОКОСМІЧНІ БУРІ**

#### **6.1 Загальні відомості**

Під час іоносферних бур суттєво збурюється іоносферний радіоканал, який служить для передачі радіосигналів у телекомунікації, радіолокації, радіонавігації та радіоастрономії в широкому діапазоні частот. Найбільше, однак, до впливу іоносферних бур схильні радіохвилі високочастотного (ВЧ) діапазону (3 – 30 МГц). У той же час, вимірювання варіацій параметрів ВЧ радіохвиль дозволяє вивчати фізичні процеси в іоносфері, викликані геокоосмічними бурями.

Мета розділу – опис ефектів геокоосмічних бур у нижній, середній і зовнішній іоносфері [360, 361]. Для дослідження нижньої іоносфери використовувався метод часткових відбиттів. Ефекти у середній іоносфері досліджувалися за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери. Ефекти у широкому діапазоні висот, які охоплювали середню та зовнішню іоносферу, досліджувалися методом некогерентного розсіяння.

Іоносферні бурі — один із проявів збурення коосмічної погоди. Аналіз кожної бурі дає цінну інформацію для прогнозування регіональної реакції іоносфери на збурення на Сонці. Метою цього розділу є представлення основних особливостей іоносферних бур, що спостерігаються засобами та методами, описаними в [278, 358–364], а також в підрозділі 1.8. Іоносферні, магнітні, атмосферні й електричні бурі є проявом геокоосмічної бурі [1–5]. Їхні дослідження сприяють більш чіткому розумінню взаємодії між підсистемами в системі Сонце–Земля [1–5].

#### **6.2 Ефекти геокоосмічної бурі в нижній іоносфері**

Ефекти геокоосмічної бурі в нижній іоносфері описані в роботі [365] на прикладі найсильнішої геокоосмічної бурі 7–11 листопада 2004 р.

### 6.2.1 Засоби та методи

Радар часткових відбиттів Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна отримує дані часткових відбиттів у діапазоні висот 73–93 км, використовуючи тривалість імпульсу 25 мкс і частоту повторення імпульсів 10 імпульсів на секунду на частотах 2.2–2.4 МГц. Вимірювання проводились безперервно з 12:30 UT 8 листопада 2004 р. до 14:30 UT 13 листопада 2004 р. Радар забезпечував дослідження концентрації електронів методом часткових відбиттів. Параметри хвильових збурень (ХЗ) були отримані активним та пасивним методами [268, 366–368].

Магнітометр-флюксометр забезпечував дослідження коливань  $H$ - і  $D$ -компонент у діапазоні періодів  $T = 1$ –1000 с. Внутрішній рівень шуму магнітометра має таку частотну залежність: 0.5 пТл при  $f = 1$  Гц, 5 пТ при  $f = 0.1$  Гц і 50 пТ при  $f = 0.01$  Гц. Дані отримувались безперервно за період 3–13 листопада 2004 р. зі швидкістю 2 пс. Фур'є-перетворення даних проводилось на часових інтервалах 24 години, а потім вибирались коливання в діапазонах періодів  $T = 1$ –1000 с і  $T = 120$ –1000 с за допомогою цифрового смуго-перегороджуючого фільтра. Для подальшого аналізу було використано зворотне перетворення Фур'є виходу кожного фільтра. Стандартні відхилення коливань  $H$ - та  $D$ -компонент розраховували за часовим інтервалом  $\Delta t = 2.5$  хв [268].

### 6.2.2 Стан космічної погоди

Супутникові та наземні спостереження за системою Сонце–міжпланетне середовище–Земля доступні за адресою [369]. На рис. 6.1 показані параметри, що описують стан космічної погоди за інтервал 3–13 листопада 2004 р. Стан космічної погоди будемо оцінювати за допомогою параметрів



сонячного вітру (концентрація  $n_{sw}$ , швидкість  $V_{sw}$ , і температура  $T_{sw}$  частинок),  $B_y$ - і  $B_z$ -компонент міжпланетного магнітного поля (ММП), густини потоків протонів  $P_p$  і електронів  $P_e$ , індексів  $K_p$  і  $D_{st}$  геомагнітного поля (рис. 6.1). Із рис. 6.1 видно, що сплески  $n_{sw}$ ,  $V_{sw}$ , і  $T_{sw}$  призвели до падіння  $B_z \approx -42$  нТл, та збільшення густини потоків  $P_p$  і  $P_e$  на декілька порядків. Це викликало зростання індекса  $K_p$  до 8.7 і падіння індекса  $D_{st}$  до  $-383$  нТл. В геокосмосі та на Землі спостерігалася одна із найсильніших геомагнітних бур.

На рис. 6.2а показано енергію, яка впорскується. Параметр  $\varepsilon_A$  використовувався для оцінки швидкості введення енергії сонячного вітру в магнітосферу Землі,  $P_A$ :

$$\varepsilon_A = \frac{V_{sw} B_t^2 \sin^4(\theta/2)}{\mu_0} R_{ef}^2$$

$$\theta = \begin{cases} \arctg(B_y / B_z) \text{ для } B_y / B_z > 0 \\ \pi - \arctg(B_y / B_z) \text{ для } B_y / B_z < 0 \\ \pi / 2 \text{ при } B_y / B_z = 0 \end{cases},$$

де  $B_y$  — компонента ММП, яка спрямована з ранку на вечір,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м,  $R_{ef} = 10R_E$  — характерний масштаб довжини поперечного перерізу магнітосфери поперек вісі хвоста магнітосфери, а  $R_E = 6380$  км — радіус Землі.

Потужність,  $P_{OM1}$ , що виділяється в іоносфері завдяки введенню енергії ММП, коли  $B_z$  була негативною, дається

$$P_{OM1} = 3.04 \times 10^{-2} |B_s| V_{sw},$$

$$P_{OM2} = 1.93 \cdot 10^{-2} p_{sw} v_{sw} + 11.8,$$

$$|B_s| = \begin{cases} |B_z| \text{ для } B_z < 0 \\ 0 \text{ для } B_z \geq 0 \end{cases}.$$

де  $p_{sw}$  — тиск сонячного вітру. Величина  $P_{OM}$  була введена в роботі [370] та задана виразом

$$P_{OM} = P_{OM1} + P_{OM2}.$$

В цих виразах,  $B_s$ ,  $V_{sw}$ ,  $p_{sw}$ ,  $P_{OM1}$ ,  $P_{OM2}$ , та  $P_{OM}$  вимірюються в нТл, км/с, нПа та ГВт відповідно.

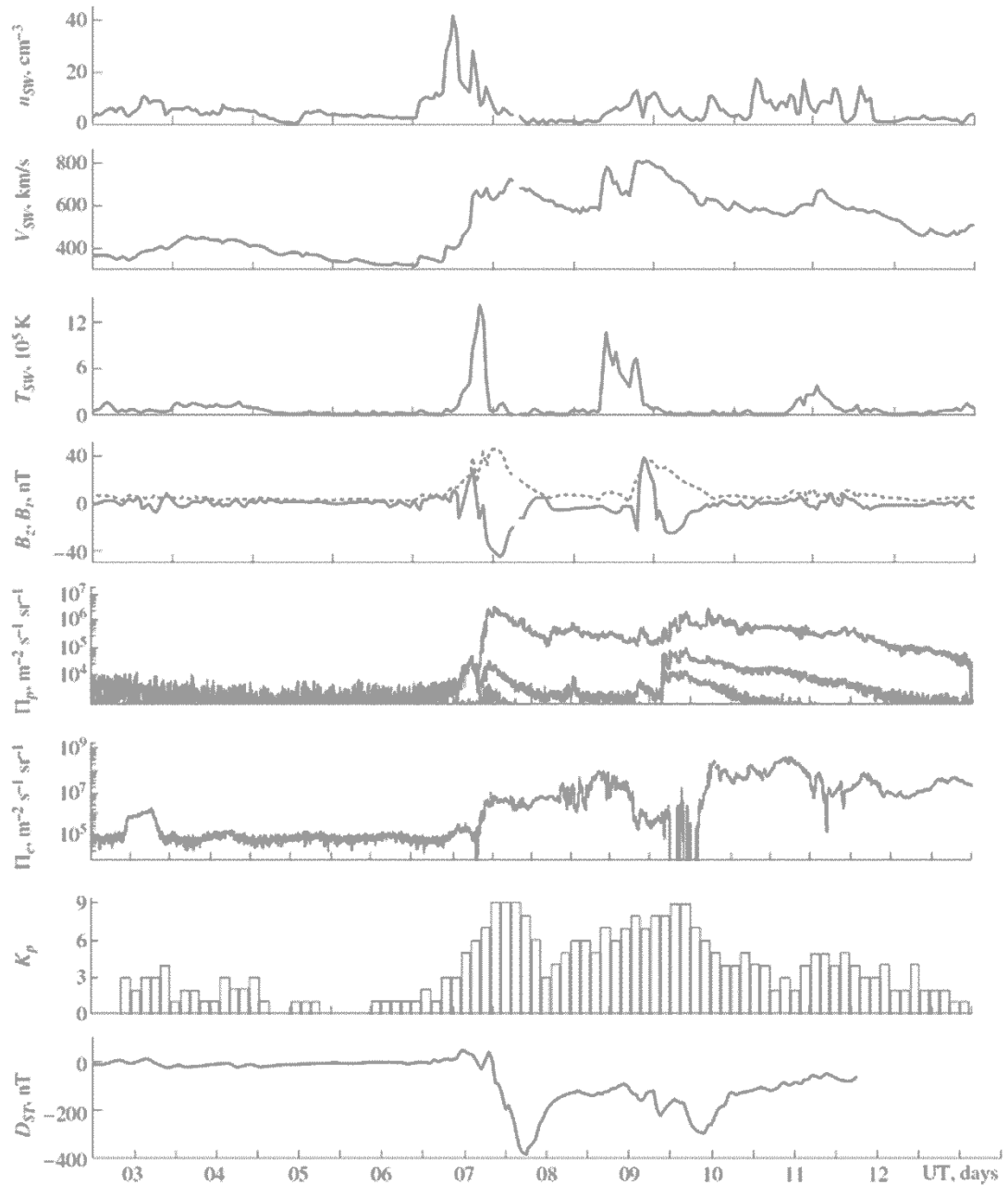


Рис. 6.1 Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації частинок  $n_{sw}$ , температури  $T_{sw}$ , радіальної швидкості  $V_{sw}$ , густини потоку протонів  $\Pi_p$  (10, 50 та 100 MeV) і електронів  $\Pi_e$  (більше 2 MeV), компонента  $B_z$  (суцільна лінія) і модуль (точки)  $B_t$  міжпланетного магнітного поля;  $K_p$ -індексу та  $D_{st}$ -індексу в період 7–13 листопада 2004 р Дати вказані уздовж осі абсцис. Стрілками на горизонтальній осі відзначені моменти початку суббурь (посилання: [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old\\_indices/](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/))

### 6.2.3 Процеси в нижній іоносфері

*Варіації концентрації електронів.* На рис. 6.3 показані коливання електронної концентрації  $N$  з часом в діапазоні висот 73–83 км. Прогалини в даних зумовлені зменшенням відношення сигнал/шум, що зробило неможливою оцінку  $N$  з прийнятною похибкою.

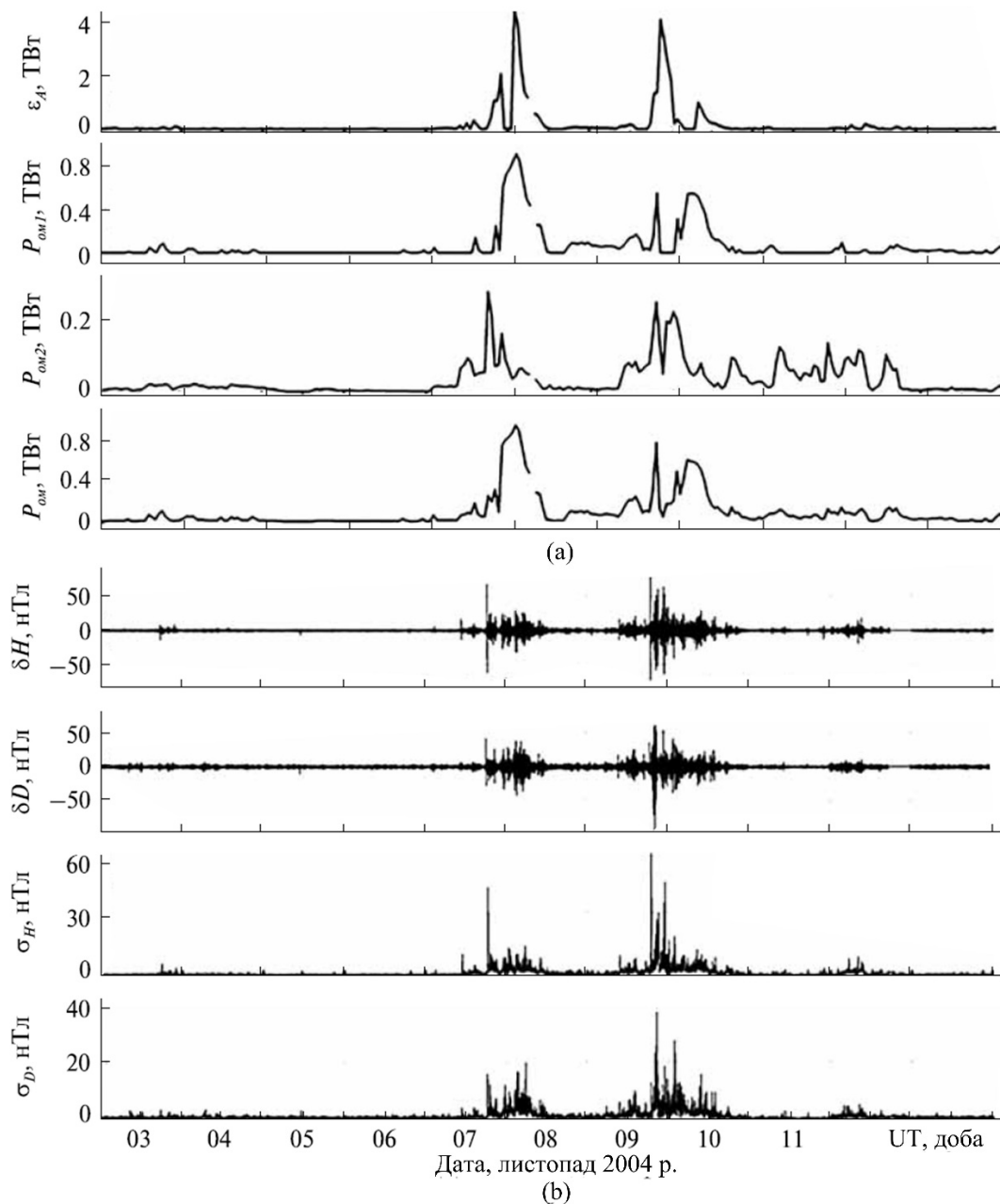


Рис. 6.2 Подача енергії в магнітосферу й іоносферу (a) та варіації геомагнітного поля 3–13 листопада 2004 р. (b)

Під час бурі максимальні значення  $N$  та її варіації демонстрували переважно збільшення [371].

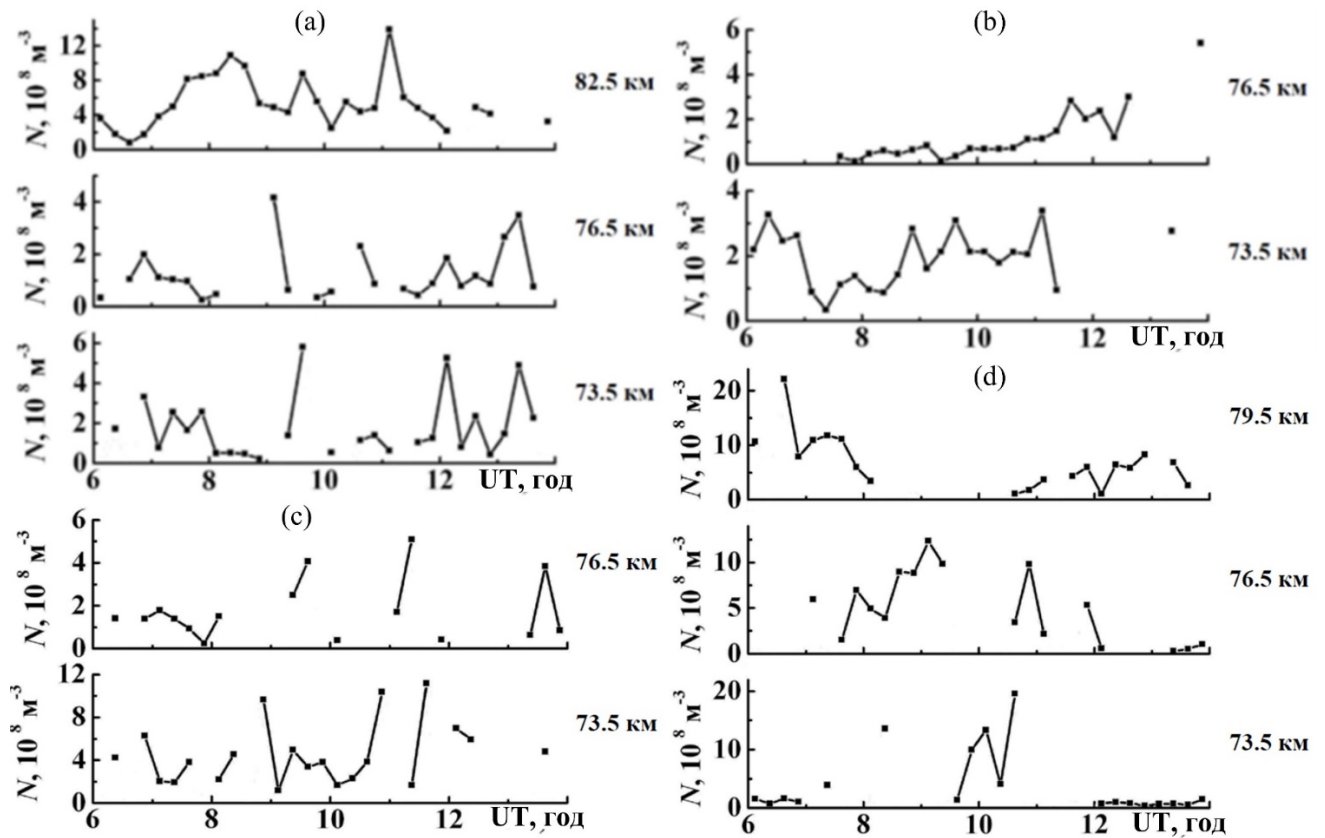


Рис. 6.3 Варіації електронної концентрації в нижній іоносфері під час малого магнітного збурення (а) 3 листопада 2004 р. та (б) 13 листопада 2004 р.; і під час бурі (с) 9 листопада 2004 р. та (д) 10 листопада 2004 р.

*Хвильові збурення.* На рис. 6.4 показано параметри хвильових збурень у нижній іоносфері, що спостерігались вдень на декількох висотах за допомогою активного методу, а на рис. 6.5 — параметри, що спостерігались вночі пасивним методом. Часові варіації коливань відносних амплітуд  $\delta N_m$  в діапазонах періодів  $T = 2\text{--}30$  хв і  $T = 30\text{--}180$  хв показані окремо.

Коливання в збуреннях геомагнітного поля вивчались у діапазонах  $T = 1\text{--}1000$  с і  $T = 120\text{--}1000$  с 8–10 листопада 2004 р. в інтервали часу, що збігаються зі спостереженням квазіперіодичних процесів у нижній іоносфері. На рис. 6.6 показані варіації амплітуд  $H$ - і  $D$ -компонент та періоду.

#### 6.2.4 Аналіз отриманих результатів

Дані, отримані в результаті супутникових та наземних спостережень, дозволили нам визначити особливості розвитку та виникнення бурі 7–10 листопада 2004 р. Рис. 6.1 показує, що ця буря повторювалась, складалася з двох геомагнітних бур та серії суббур, а велика інжекція енергії бурі спричинила значні збурення в іоносфері. Параметр Акасофу  $\epsilon_A$ , який використовується для оцінки швидкості притоку енергії сонячного вітру в магнітосферу Землі ( $P_A$ ), дає значення, що перевищує 4 ТВт (див. рис. 6.2а). Поряд з  $P_A$ , потужність,  $P_{OM1}$ , що виділяється в іоносфері за рахунок введення енергії ММП, і потужність,  $P_{OM2}$ , що виділяється в іоносфері за рахунок кінетичної енергії сонячного вітру, також є важливими величинами, які можна використовувати для характеристики бур, а також їх суми  $P_{OM}$ .

Ефекти бурі в нижній іоносфері на середніх широтах, як правило, спричинені висипанням високоенергійних електронів з радіаційних поясів Землі, які відбуваються під час усіх фаз геомагнітних бур. У цьому випадку спостерігаються значні відхилення амплітуд і фаз НЧ і ДНЧ-сигналів від фонових значень [372, 373], а також значні коливання електронної концентрації та амплітуд звичайної та незвичайної компонент сигналів радара часткових відбиттів [374]. Значне висипання електронів (так звані ефекти після бурі) відбувається під час фази відновлення після бурі. Ці ефекти є найбільш вираженими, якщо під час цієї фази починається нове магнітне збурення, яке мало місце під час цієї бурі [375, 376]. Потоки електронів з магнітосфери в іоносферу, очевидно, спричинили значне збільшення  $N$  (на 50–100% і більше) вдень 9 листопада 2004 р. (див. рис. 6.3). Ці ефекти були найбільш вираженими 10 листопада 2004 р., коли значення  $N$  в максимумах пульсацій перевищило фонові значення в 3–5 разів.

Переміщення максимальних значень  $N$  з часом на більш низькі висоти можна пояснити збільшенням енергії електронів, що висипались з 06:00 до 12:00 UT 10 листопада 2004 р.

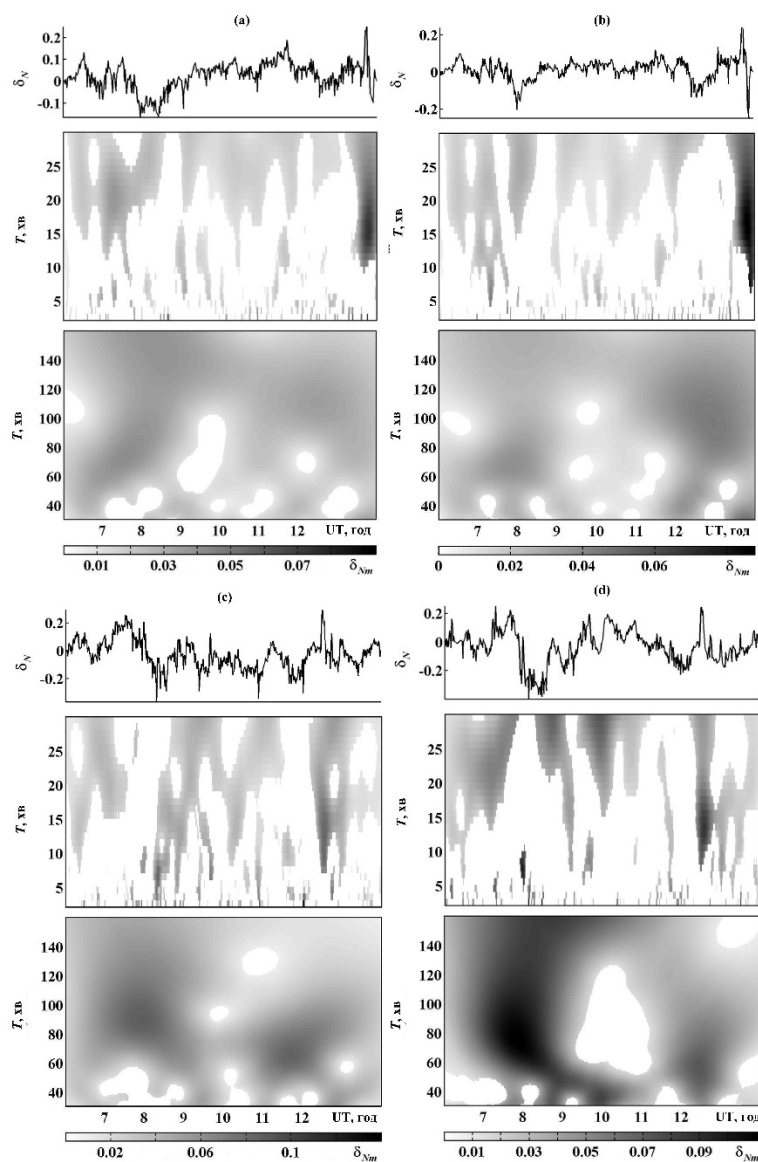


Рис. 6.4 Параметри хвильових збурень в електронній концентрації, які отримані активним методом під час бурі 9 листопада 2004 р. на висотах (а) 84 км та (b) 87 км, а 10 листопада 2004 р. на висотах (с) 87 км та (d) 93 км

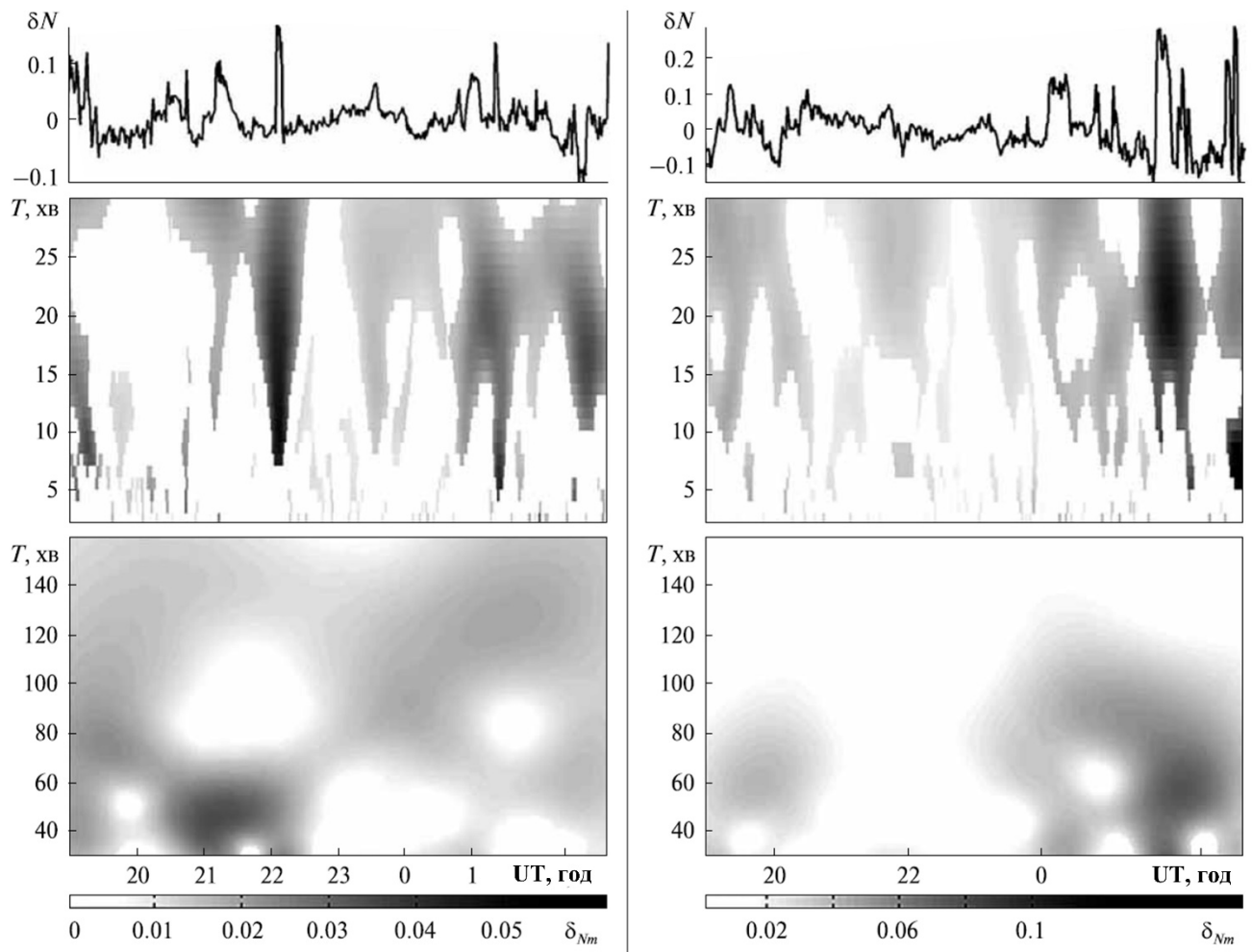


Рис. 6.5 Параметри хвильових збурень в електронній концентрації, які отримані пасивним методом під час бурі 8–9 листопада 2004 р. і 9–10 листопада 2004 р.

Збурення під час бур часто супроводжуються ефективною генерацією та підсиленням акустичних та атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) з періодами  $T \leq 3$  год. Під час бур АГХ зазвичай спричинені варіаціями електромагнітних полів, електричними струмами, потоками заряджених частинок у високих широтах тощо. Ці хвилі поширюються в середні та низькі широти і викликають значні хвильові збурення концентрації, температури та дрейфу нейтральних і заряджених частинок. Квазіперіодичні висипання електронів з магнітосфери можуть бути іншим джерелом хвильових збурень у нижній іоносфері на середніх широтах. Збільшення амплітуд хвильових збурень з періодами  $T = 20\text{--}100$  хв, що спостерігалися вночі 9–10 листопада 2004 р., і вдень 10 листопада 2004 р., можуть

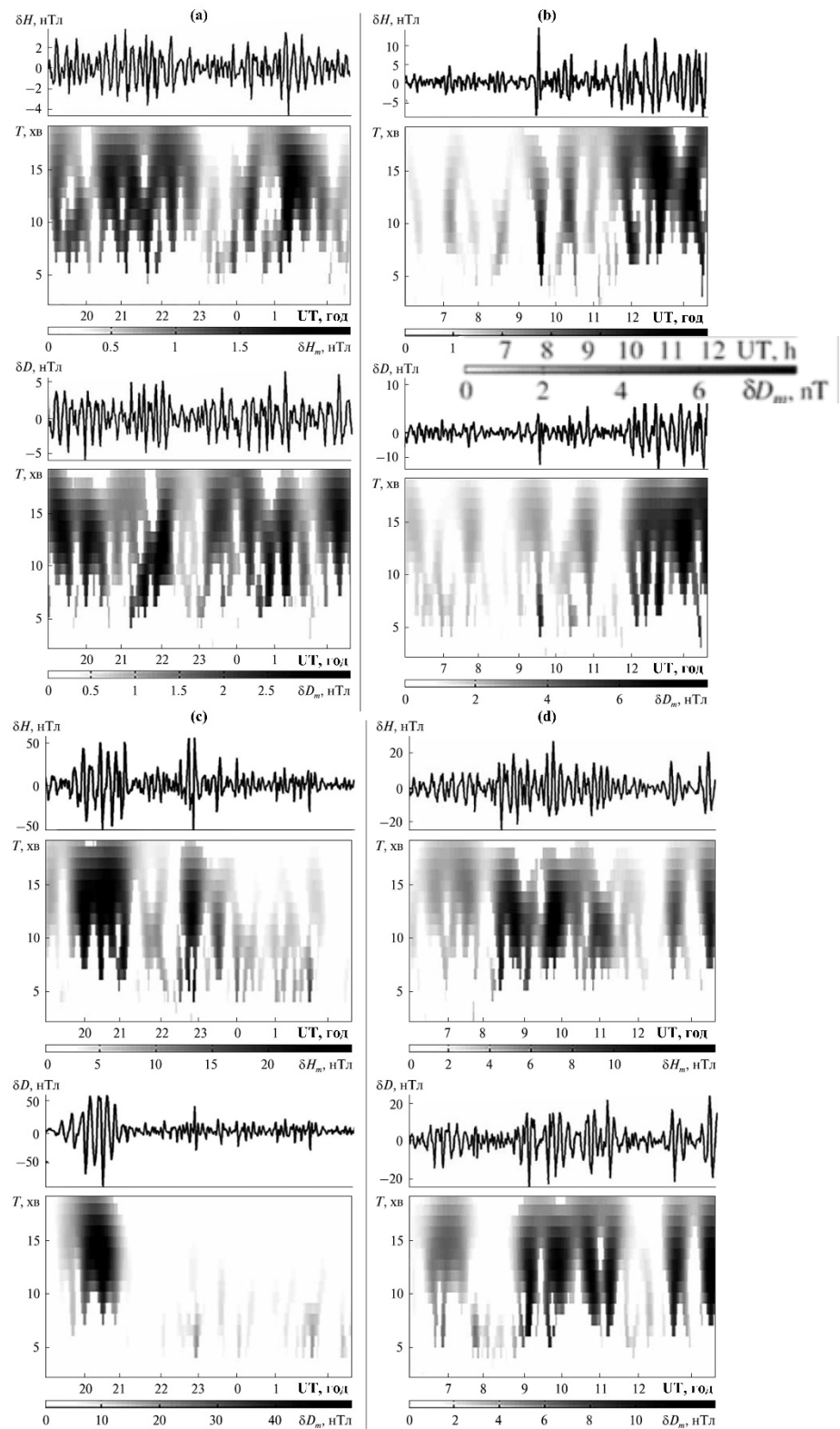


Рис. 6.6 Пульсації Pc5–Pc6 ( $H$ - і  $D$ -компоненти) (а) 8–9 листопада 2004 р., (б) 9 листопада 2004 р., (с) 9–10 листопада 2004 р., та (д) 10 листопада 2004 р.

бути спричинені такими процесами. В цілому для цієї бурі не було виявлено чіткої кореляції між рівнем магнітної активності та параметрами хвильових



збурень у нижній іоносфері. В цьому регіоні переважають АГХ, що поширювалися з нижчих шарів атмосфери. У цьому випадку ГХ опосередковано впливають на параметри хвильових збурень у цій області, цей вплив виявляється під час статистичного аналізу амплітуд та періодів хвильових збурень, характерних для збурених умов.

Рис. 6.2b показує, що коливання  $H$ - і  $D$ - компонент з  $T = 1\text{--}1000$  с значно зросли після раптового початку бурі. Як правило, вони спричиняються раптовим стисненням магнітосфери, збільшенням потоку заряджених частинок у полярній області, генерацією МГД-хвиль та ін. Дослідження коливань геомагнітного поля з  $T = 300\text{--}1000$  с, які пов'язані з пульсаціями  $Pc5\text{--}6$  під час бур, становлять особливий інтерес. Раніше було показано, що такі пульсації спричинені коливаннями ММП, варіаціями густини електричного струму повздовж магнітного поля, утворенням вихорів іоносферної конвекції тощо [377].

Окремі сплески амплітуд цих коливань, які ми спостерігали 8–10 листопада, 2004 р. (див. рис. 6.2), співпадали у часі зі значними варіаціями та змінами знака  $B_z$ , що супроводжувалися розвитком суббур у полярних шапках під час другого збурення в магнітному полі Землі. Це також вказує на те, що коливання параметрів ММП і сонячного вітру ефективно впливають безпосередньо (за допомогою гідромагнітних хвиль) та опосередковано (через процеси в закритій магнітосфері та іоносфері) на зміни магнітного поля в магнітосфері.

Раніше було відзначено зв'язок між пульсаціями  $Pc5\text{--}6$  та  $Pi3$  та коливаннями в параметрах нижньої іоносфери з тими саме періодами ( $T = 5\text{--}20$  хв). Вони вказують на два фактори, які можуть спричинити такий зв'язок між магнітними та іоносферними параметрами. По-перше, збільшення амплітуд магнітних пульсацій на середніх широтах під час головної фази бурі стимулює квазіперіодичне висипання електронів із магнітосфери. У цьому випадку спостерігаються синхронні варіації магнітного поля та електронної концентрації в нижній

іоносфері. По-друге, магнітні пульсації генеруються в полярних широтах внаслідок квазіперіодичного висипання електронів в області, де електричні струми протікають повздовж магнітного поля Землі, а також генеруються АГХ, що поширюються на середні та низькі широти, однак магнітні пульсації зазвичай випереджають хвильові збурення електронної концентрації на 30–60 хв, і цей зв'язок між ними спостерігається як у магнітноспокійні, так і в збурені дні. З деякою затримкою під час розглянутої бурі ми виявляли як появу хвильових збурень в магнітному полі, так і в електронній концентрації з  $T = 5\text{--}15$  хв, а також затримку останньої навіть на 30–60 хв. Можна припустити, що обидва механізми взаємозв'язку між магнітними та іоносферними параметрами ефективні. Однак не слід виключати припущення, що короткочасні хвильові збурення в нижній іоносфері можуть мати іншу природу. Щоб знайти чіткий взаємозв'язок між параметрами хвильових збурень у нижній іоносфері та магнітному полі та виявити ступінь впливу магнітосферних та метеорологічних процесів на порушення в нижній іоносфері, необхідні подальші дослідження.

### **6.3 Ефекти геокоsmічної бурі в середній іоносфері**

Мета цього підрозділу – виклад результатів спостережень за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери Харбінського інженерного університету ефектів іоносферної бурі над Китаєм, що мала місце 14 травня 2019 р.

Розглянемо ефекти геокоsmічної бурі в середній іоносфері на прикладі бурі 14–15 травня 2019 р. [360].

#### **6.3.1 Стан коsmічної погоди**

Часові залежності низки параметрів, що характеризують стан коsmічної

погоди, наведені на рис. 6.7.

Концентрація частинок у сонячному вітрі 12 – 13 травня 2019 р. не перевищувала  $(3 - 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . 14 травня 2019 р. в інтервалі часу з 04:00 до 09:00 (тут і далі UT) вона збільшувалася до  $11.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ .

Швидкість частинок сонячного вітру  $V_{sw}$  11 – 12 травня 2019 р. була близько 360 км/с. 13 – 14 травня 2019 р. вона поступово збільшувалася до 557 км/с (о 08:00 14 травня 2019 р.). Далі вона флюктувала біля значення  $\sim 400$  км/с. У ніч з 16 на 17 травня 2019 р.  $V_{sw}$  зросла до 600 км/с.

Різке збільшення температури частинок сонячного вітру  $T_{sw}$  від  $\sim 10^4 \text{ К}$  до  $4.35 \cdot 10^5 \text{ К}$  мало місце о 03:00 14 травня 2019 р. Другий сплеск  $T_{sw}$  до  $3.2 \cdot 10^5 \text{ К}$  спостерігався близько 10:00 17 травня 2019 р.

Зростання  $n_{sw}$  і  $V_{sw}$  призвели до зростання від 0.2 нПа до 6 нПа динамічного тиску сонячного вітру.

З 02:00 до 08:00 14 травня 2019 р. спостерігалось різке зменшення  $B_z$ -компоненти міжпланетного магнітного поля від 0 нТл до  $-10$  нТл.  $B_y$ -компонента 11 – 12 травня 2019 р. флюктувала в межах від  $-6$  нТл до  $+5$  нТл.

Сплески функції Акасофу  $\varepsilon_A$ , яка описує приток енергії сонячного вітру в магнітосферу, мали місце з 02:00 до 12:00 11 травня 2019 р., з 00:00 до 10:00 та з 15:00 до 22:00 14 травня 2019 р.

$K_p$ -індекс збільшувався до 5, 6.3 та 3 11 травня, 14 травня та 16 травня 2019 р. відповідно.

З 03:00 і до 07:00 14 травня 2019 р. спостерігалось різке падіння  $D_{st}$ -індексу від  $-5$  нТл до  $-65$  нТл, що означає настання основної фази магнітної бурі. Фаза відновлення тривала з 07:00 14 травня 2019 р. до 08:00 15 травня 2019 р.

Часові варіації параметру Акасофу  $\varepsilon_A$ , геомагнітного індексу  $K_p$  та екваторіального індексу  $D_{st}$  свідчать про те, що після магнітної бурі, основна фаза

якої протікала 14 травня 2019 р. з 03:00 до 07:00 UT, спостерігалася суббуря з 15:00 UT до 24:00 UT 14 травня 2019 р.

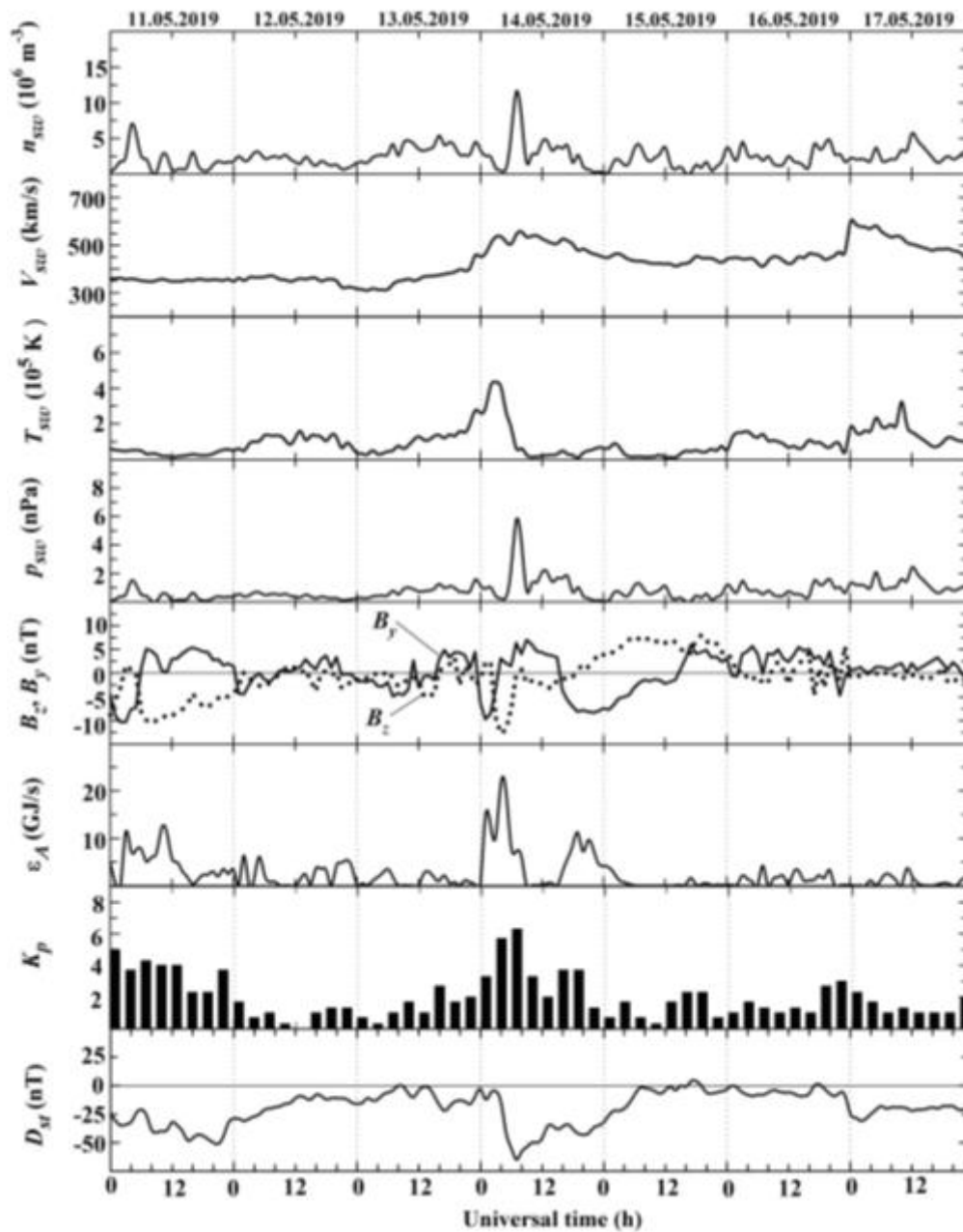


Рис. 6.7 Стан космічної погоди. Концентрація протонів у сонячному вітрі  $n_{sw}$ , швидкість сонячного вітру  $V_{sw}$ , температура іонів у сонячному вітрі  $T_{sw}$ , розрахований динамічний тиск сонячного вітру  $p_{sw}$ , компоненти  $B_z$ ,  $B_y$  міжпланетного магнітного поля, розрахований параметр Акасофу  $\epsilon_A$ , індекси магнітної активності  $K_p$  і  $D_{st}$  11 – 17 травня 2019 р. Дані зі штучних супутників ACE і GOES отримані на [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old\\_indices/](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/)

Часові варіації  $H$ -,  $D$ - і  $Z$ -компонент геомагнітного поля 13, 14 та 15 травня 2019 р., що зареєстровані в Низькочастотній обсерваторії Радіоастрономічного інституту НАНУ за допомогою метеомагнітної станції LEMI-017 ( $49.93^{\circ}\text{N}$ ,  $36.95^{\circ}\text{E}$ ) [378], наведені на рис. 6.8. Різкі зміни рівня компонент спостерігалися приблизно з 03:00 до 09:00 14 травня 2019 р.

На рис. 6.9 наведені часові варіації горизонтальних  $H$ - і  $D$ -компонент, що зареєстровані магнітометром-флюксометром у Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна ( $49.65^{\circ}\text{N}$ ,  $36.93^{\circ}\text{E}$ ). Видно, що в інтервалі часу 04:30 – 09:30 рівень флуктуацій збільшувався від 2–3 до 10 разів.

Підкреслимо, що магнітна буря 14 травня 2019 р. була однією з найсильніших у 2019 р. Очікувалося, що сильна магнітна буря буде супроводжуватися досить унікальною іоносферною бурею. Цим і пояснюється виявлений до неї інтерес.

### 6.3.2 Засоби та методи

Для дослідження ефектів геокосмічної бурі використовувався багаточастотний багатотрасовий програмно-апаратний комплекс похилого зондування іоносфери Харбінського інженерного університету, описаний в роботах [288, 303–305, 347, 361] і в підрозділі 1.8. В якості радіопередавальних пристроїв використовуються широкомовні станції, дислоковані в Китаї, Південній Кореї, Японії, Росії та Монголії. Радіоприймальна та реєструюча частини комплексу знаходяться на території Харбінського інженерного університету ( $45.78^{\circ}\text{N}$ ,  $126.68^{\circ}\text{E}$ ).

Неперервний моніторинг динамічних процесів у іоносфері здійснюється на 14 радіотрасах у діапазоні частот 5 – 10 МГц. Параметри радіопередавальних пристроїв та радіотрас наведені в підрозділі 1.8.

### 6.3.3 Результати спостережень

*Радіотраса Lington/Pucheng–Harbin.* Радіостанція, що працює на частоті 5000 кГц, знаходиться на території КНР. Довжина радіотраси вздовж поверхні Землі  $R \approx 1875$  км.

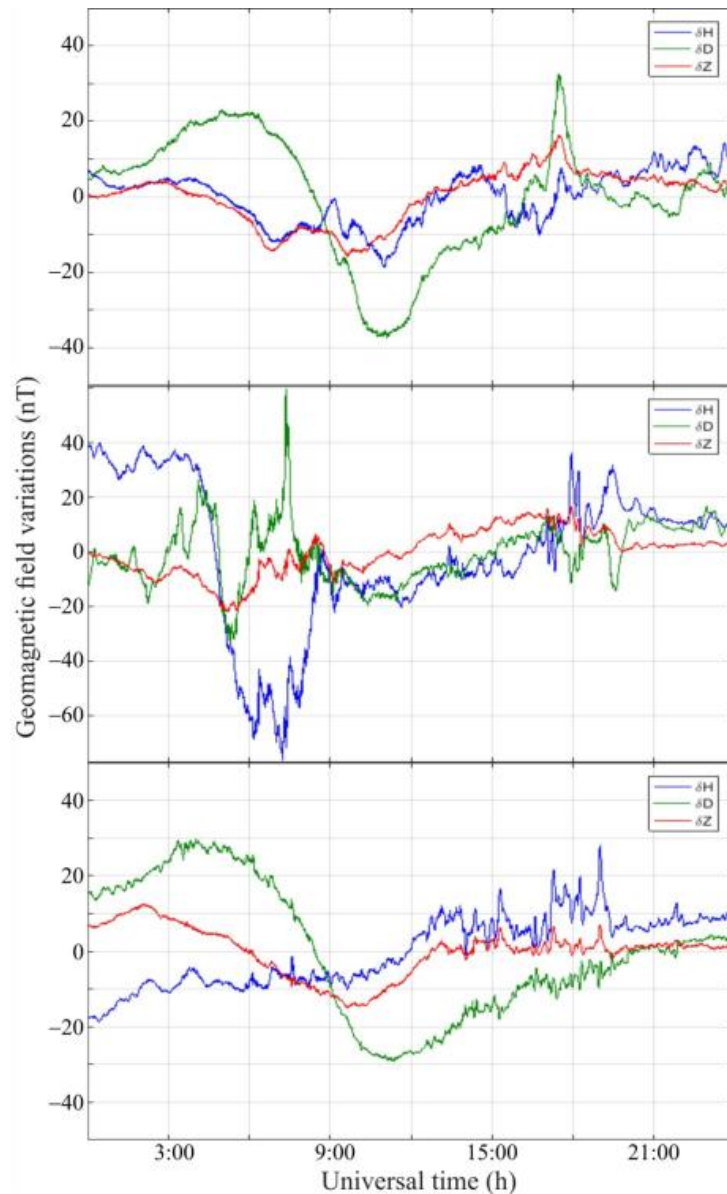


Рис. 6.8 Часові варіації спрямованих з півдня на північ  $H$ - і з заходу на схід  $D$ -компонент геомагнітного поля та вертикальної компоненти  $Z$ , які були виміряні на Низькочастотній обсерваторії Інституту радіоастрономії, Україна, ( $49.93^\circ\text{N}$ ,  $36.95^\circ\text{E}$ ) 13 травня 2019 р. (зверху), 14 травня 2019 р. (посередині), та 15 травня 2019 р. (внизу). Дані представлені за посиланням [378]

Доплерограми для доби з іоносферною бурею 14 травня 2019 р. і контрольних діб 13 і 15 травня 2019 р. наведені на рис. 6.10. З рис. 6.10 видно, що з 00:00 до 06:00 UT (в денний час за місцевим часом) амплітуда сигналу була досить мала ( $-(70 - 65)$  дБВ), доплерівські спектри були дифузними. Доплерівське зміщення основної моди  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Перед заходом Сонця та після нього амплітуда сигналу суттєво (на 20 – 30 дБВ) зросла, а доплерівські спектри були протягом усієї місцевої ночі дифузними.

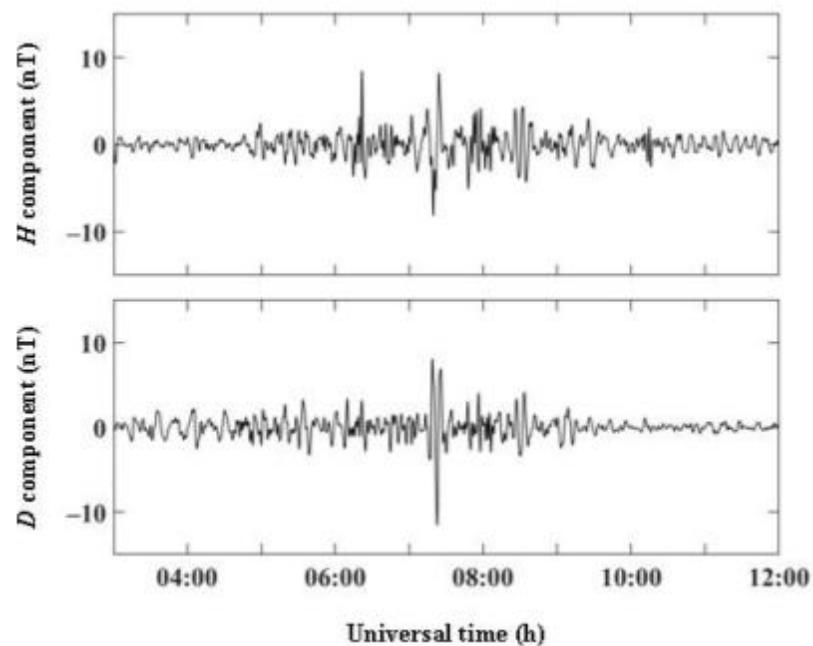


Рис. 6.9 Часові варіації горизонтальних ( $H$ -,  $D$ -) компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 100–1000 с 14 травня 2019 р., які були зареєстровані в Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна, Україна ( $49.65^\circ\text{N}$ ,  $36.93^\circ\text{E}$ )

14 травня 2019 р. з 06:00 до 11:00 поведінка доплерограм значно відрізнялася від їх поведінки в контрольні доби. Приблизно близько 06:00 мало місце різке падіння  $f_D$  від 0 Гц до  $-0.7$  Гц. Далі спостерігалися квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з періодом  $T \approx 20$  хв та амплітудою  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.15$  Гц. Крім того, близько 08:00 і 10:00 відзначалися різкі зменшення доплерівського зміщення частоти від 0 Гц до

–0.5 Гц. Розширення доплерівських спектрів у нічний час було меншим, ніж їх розширення в контрольні доби.

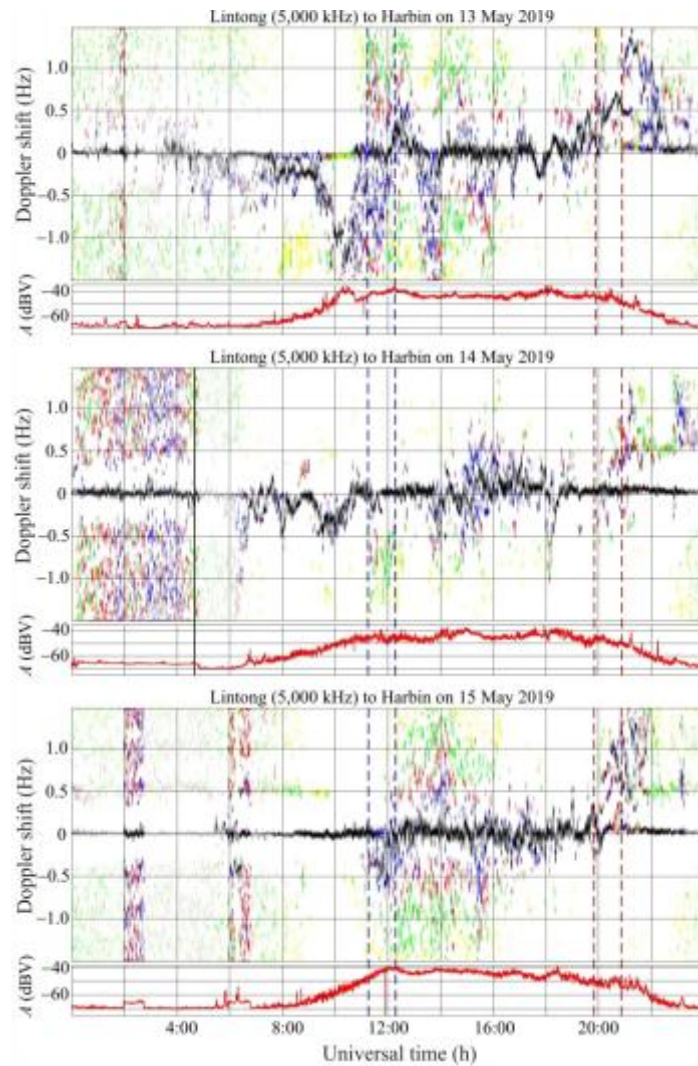


Рис. 6.10 Часові варіації доплерівських спектрів та амплітуди сигналів уздовж радіотраси Lintong–Harbin 13, 14 та 15 травня 2019 р. (панелі зверху донизу відповідно). Частота радіохвилі 5000 кГц. Амплітуди доплерівських ліній відмічено чорним-синім-червоним-зеленим-жовтим кольорами, показані відносні амплітуди 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 відповідно. Кожний інтервал рисунку в 1 год побудовано з 117600 вибірок. Штрихові лінії позначають захід і схід Сонця на висоті 0 і 100 км. Суцільні вертикальні лінії показують початок іоносферної бурі. У кожній панелі під доплерівським спектром показана амплітуда сигналу  $A$  на виході радіоприймача в децибелах відносно 1 В



Слід також зазначити, що негативні варіації в доплерівському зміщенні частоти мали місце приблизно з 04:00 UT до 10:00 UT 13 травня 2019 р. Однак їх природа, швидше за все, не пов'язана з іоносферною бурею. Зокрема, геомагнітно-спокійні умови підтримують цей висновок.

*Радіотраса Hwaseong–Harbin.* Передавальна станція, яка функціонує на частоті 6015 кГц, розміщена в Республіці Корея. При цьому  $R \approx 950$  км. З 00:00 і до 03:30 радіостанція не випромінювала.

У контрольну добу 13 травня 2019 р. доплерівські спектри майже весь час були дифузними, а 15 травня 2019 р. (рис. 6.11) вони були дифузними тільки протягом заходу Сонця в іоносфері та невдовзі після нього.

14 травня 2019 р. дифузність спектрів була незначною. Близько 06:30  $f_D(t)$  різко зменшився від 0 Гц до  $-0.7$  Гц. Повторні зменшення спостерігалися близько 07:00 і 09:30. При цьому значення  $f_{D\min}$  досягали  $-0.3$  Гц і  $-0.5$  Гц відповідно. На рис. 6.11 видно, що зменшення доплерівської частоти на  $-1.3$  Гц відбулося о 14:00 UT 14 травня 2019 р. Згодом виникли квазіперіодичні варіації з періодом приблизно 40 хвилин та амплітудою 0.2–0.4 Гц.

*Радіотраса Chiba/Nagara–Harbin.* Радіостанція, що випромінює на частоті 6055 кГц, знаходиться в Японії. При цьому  $R \approx 1610$  км. Випромінювання мало місце з 00:00 до 15:00.

На відміну від контрольних діб, 14 травня 2019 р. з 05:30 до 06:30 значення  $f_D(t)$  різко зменшувалися від 0 Гц до  $-1.2$  Гц (рис. 6.12). Доплерівські спектри зазнавали розширення від  $-1.5$  Гц до  $+1.5$  Гц. Повторні різкі зменшення  $f_D$  спостерігалися близько 08:00 і 9:30. Відзначалися квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з  $T \approx 20$  хв і  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц.

*Радіотраса Goyang–Harbin.* Радіостанція, що працює на частоті 6600 кГц, територіально розташована в Республіці Корея. Відстань  $R \approx 910$  км. Станція випромінювала в інтервалі часу 04:40 – 23:20.

На відміну від контрольних днів, 14 травня 2019 р. приблизно з 06:00 до 06:25  $f_D(t)$  різко зменшувався від  $\sim 0$  Гц до  $-0.9$  Гц (рис. 6.13). Далі спостерігалися

квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з  $T \approx 20$  хв і  $f_{Da} \approx 0.15$  Гц. Крім того, з 07:30 до 09:00 мали місце квазіперіодичні коливання доплерівського зміщення частоти з  $T \approx 5$  хв і  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц.

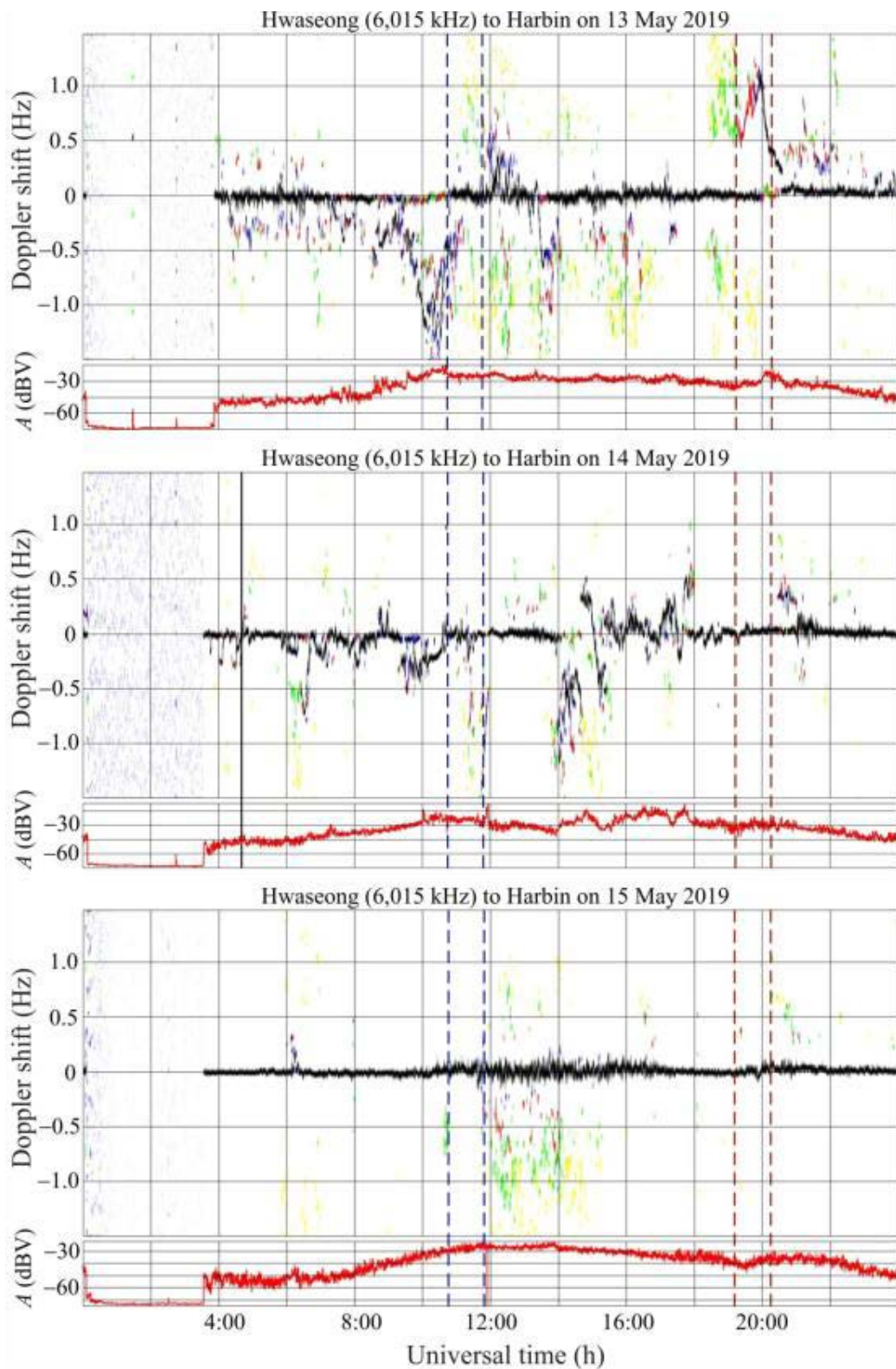


Рис. 6.11 Так само, як на рис. 6.10, але для радіотраси Hwaseong – Harbin на 6015 кГц

Повторні різкі зменшення  $f_D$  14 травня 2019 р. спостерігалися приблизно о 08:00 і близько 10:00.

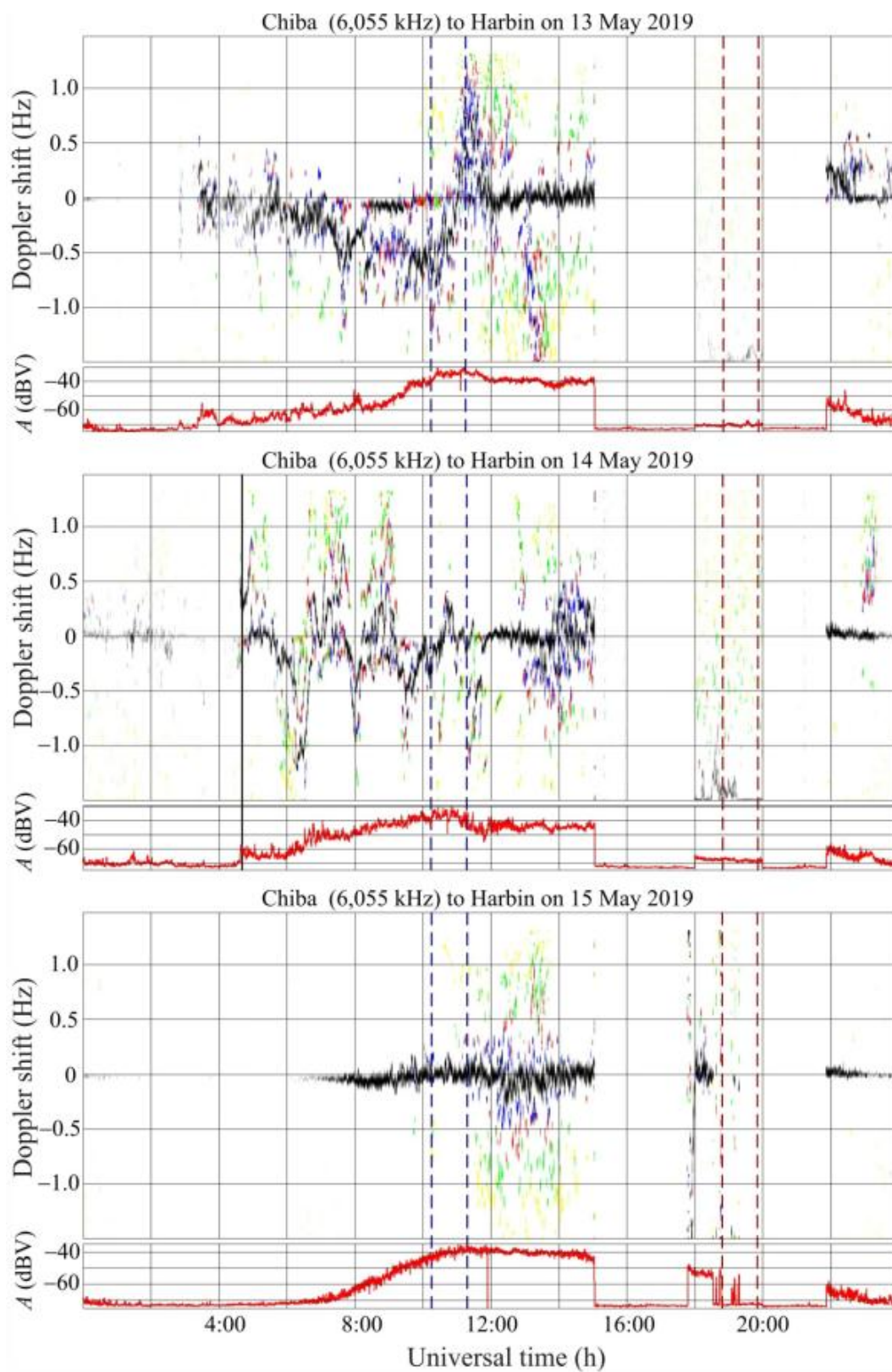


Рис. 6.12 Так само, як на рис. 6.10, але для радіотраси Chiba – Harbin на 6055 кГц



Слід зазначити, що різке та значне зменшення доплерівського зміщення частоти спостерігалось також у контрольний день 13 травня 2019 р. Протягом

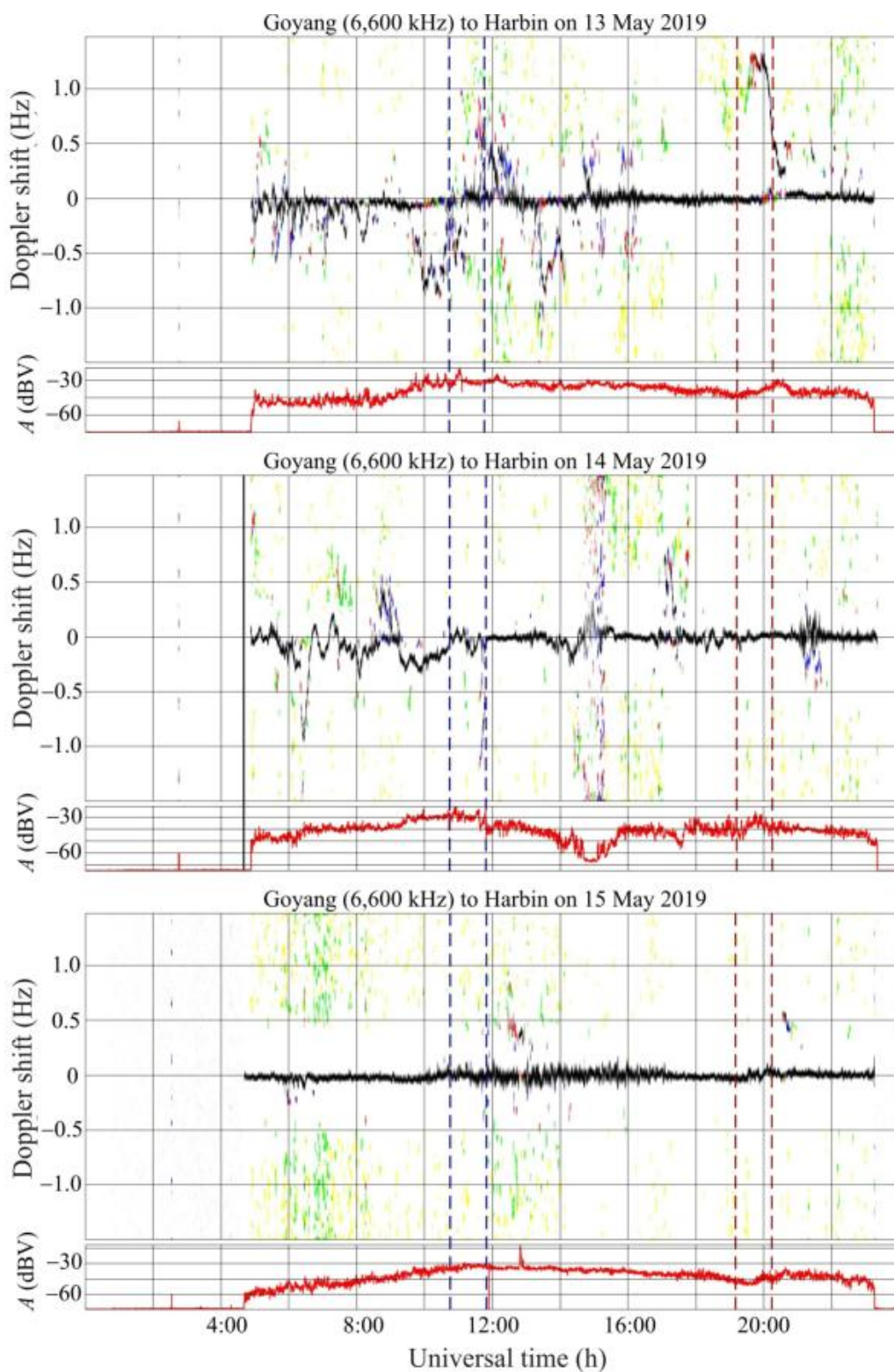


Рис. 6.13 Так само, як на рис. 6.10, але для радіотраси Goyang – Harbin на 6600 кГц

періоду 05:00–08:00 UT та о 10:00 UT і 13:30 UT. Однак доплерівські спектри 13 травня 2019 р. та 14 травня 2019 р. демонструють суттєво різну поведінку

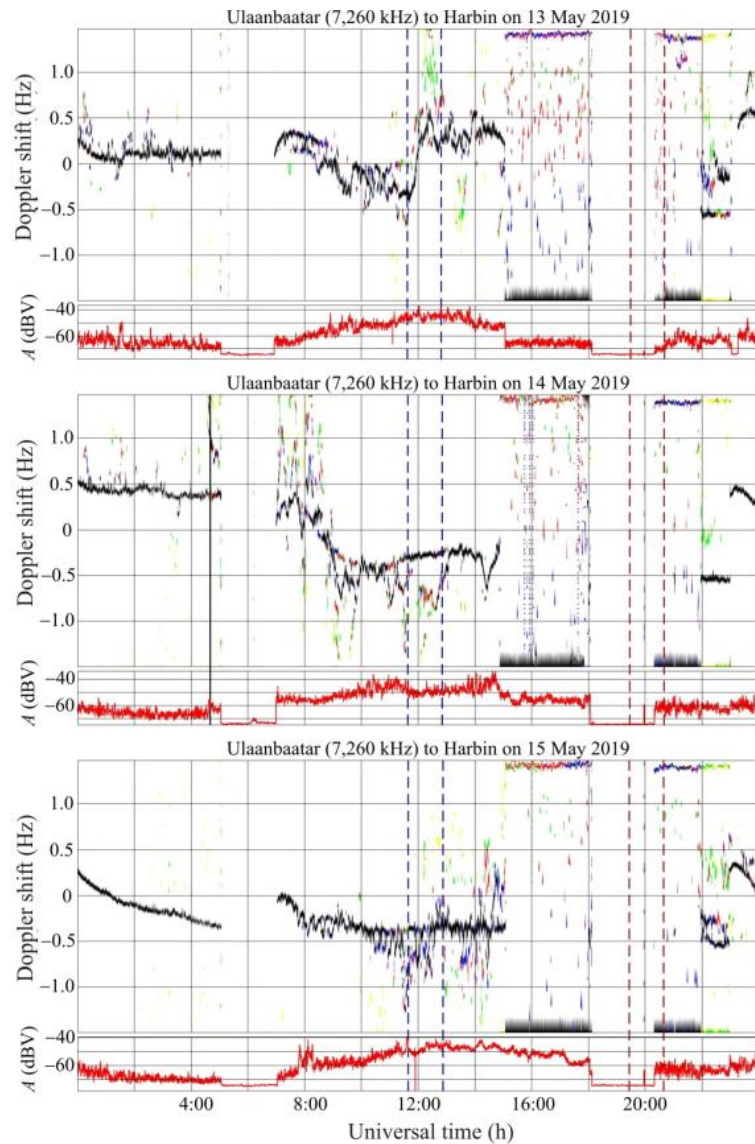


Рис. 6.14 Так само, як на рис. 6.10, але для радіотраси Ulaanbaatar – Harbin на 7260 кГц

протягом періоду 05:00–12:00 UT. Причини варіацій доплерівського спектру також були різними.

*Радіотраса Ulaanbaatar–Harbin.* Радіостанція, що функціонує на частоті 7260 кГц, розміщена на території Монголії. При цьому  $R \approx 1496$  км. З 05:00 до 07:00 13 і 15 травня 2019 р. радіостанція не випромінювала.

На відміну від контрольних днів, 14 травня 2019 р. з 07:00 до 09:00 відзначалися квазіперіодичні варіації  $f_D(t)$  з періодами 15 і 30 хв (рис. 6.14). Їх амплітуда була близько 0.05 Гц і 0.1 Гц відповідно. Ми наголошуємо, що в контрольний день 15 травня 2019 р. спостерігались квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти з періодом 15 хв та амплітудами 0.05–0.10 Гц, які почалися о 07:39 UT. Їх природа, звичайно, не пов’язана з іоносферною бурею.

З 07:00 до 10:00 14 травня 2019 р. доплерівські спектри були дифузними й займали діапазон від 1.5 Гц до –1.4 Гц. 14 травня 2019 р. в інтервалі часу 07:00 – 11:00 значення  $\bar{f}_D(t)$  були на 0.2 Гц менше, ніж  $\bar{f}_D(t) \approx -0.3$  Гц 13 травня 2019 р.

*Радіотраса Shijiazhuang–Harbin.* Радіопередавальний пристрій, який випромінює на частоті 9500 кГц, знаходиться в КНР. При цьому  $R \approx 1310$  км. Протягом діб перерв у радіовипромінюванні не було.

У контрольні доби з 00:00 до 11:00 мали місце незначні варіації  $f_D(t)$  (рис. 6.15). Поблизу вечірнього і ранкового термінаторів доплерівські спектри зазнавали значного (до 2 – 3 Гц) розширення. Протягом діб спостерігалися сильні (до 10 – 15 дБВ) варіації амплітуд сигналу.

14 травня 2019 р. з 00:00 до 06:00 доплерівське зміщення частоти, флюктууючи в межах від –0.2 Гц до 0.2 Гц, залишався майже весь час позитивним. З 06:00 до 09:00 амплітуда сигналу впала до –71 дБВ, тобто відбитий сигнал практично не спостерігався.

### 6.3.4 Ефекти іоносферної бурі

Настання іоносферної бурі та закінчення фази відновлення важко визначити. Індекс  $D_{st}$ ,  $f_oF_2$  та уявні висоти шару  $F_2$  показують, що настання іоносферної бурі сталося між 04:00 UT та 05:00 UT і продовжилось приблизно до 16:00 UT. Ефекти

іоносферної бурі непросто відрізнити від ефектів, що виникають від інших збурень. Поведінка доплерівських спектрів показує, що контрольний день

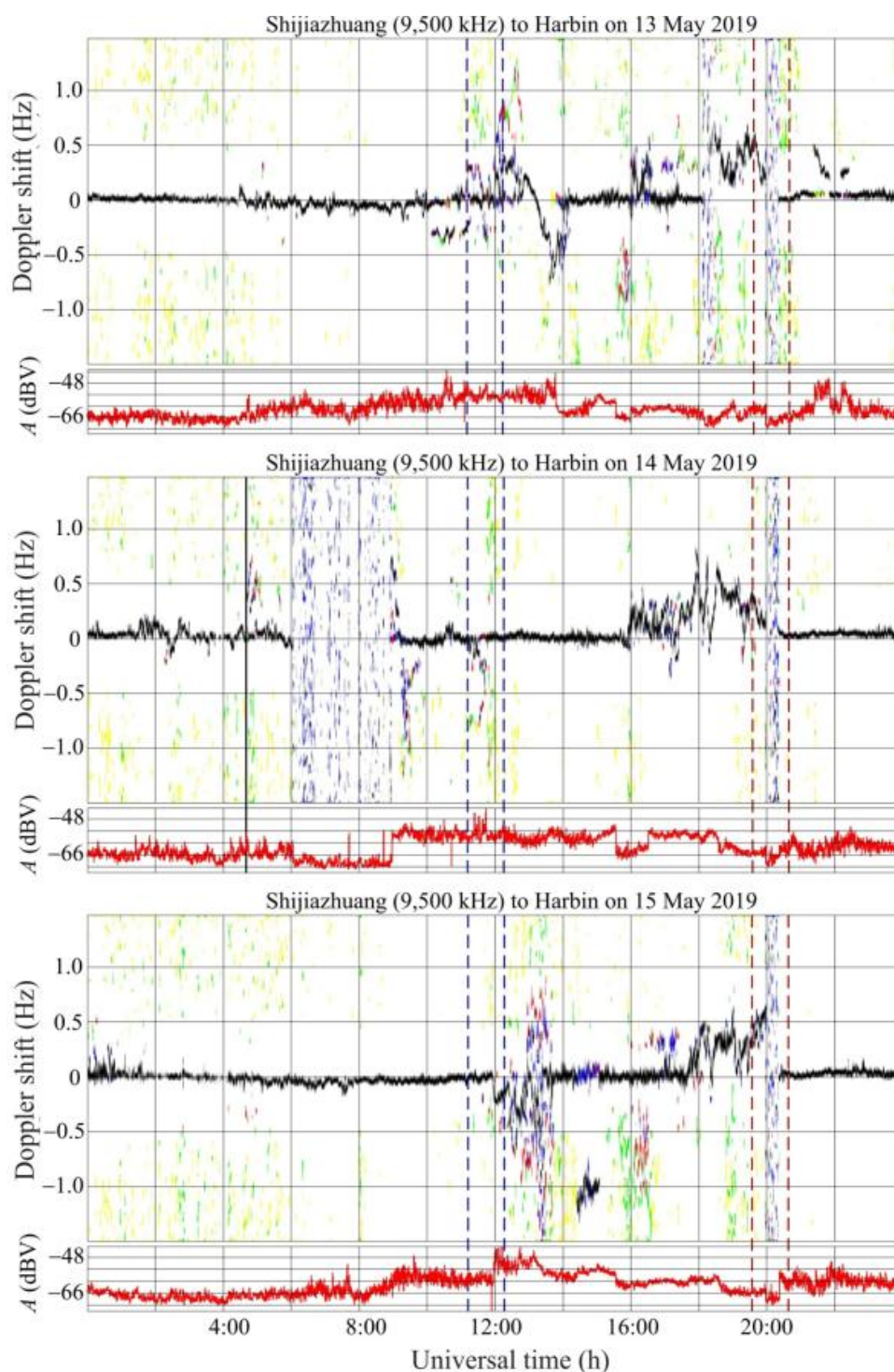


Рис. 6.15 Так як на рис. 6.10, але для радіотраси Shijiazhuang – Harbin на 9500 кГц

13 травня 2019 р. також був дещо збурений. Отже, результати вимірювань 14 та 15 травня 2019 р. є придатними для виявлення ефектів іоносферної бурі.

Різке зменшення доплерівського зміщення частоти  $f_D$  від 0 Гц до  $-(0.7 - 1.2)$  Гц, а потім збільшення до 0 Гц для різних радіотрас, що настало синхронно після 06:00, свідчить про рух області відбиття радіохвиль вгору. Тривалість  $\Delta T_1$  різкого падіння  $f_D(t)$  становила близько 15 – 25 хв, потім протягом часу  $\Delta T_2 \approx 15 - 25$  хв  $f_D(t)$  збільшувався до 0 Гц. Загальна тривалість  $\Delta T$  ефекту становила  $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \approx 30 - 50$  хв. Відомості про доплерівське зміщення частоти та про параметри збурення в іоносфері наведені в табл. 6.1. З табл. 6.1 видно, що зміщення вгору області відбиття радіохвиль досягав 53 – 183 км.

Розглянемо далі стан іоносфери в день бурі та в контрольні дні. Для цього скористаємося даними найближчих іонозондів Wakkanai (Японія, 45.39°N, 141.68°E) (рис. 6.16, рис. 6.17) і Хабаровськ (Росія, 47.52°N, 134.72°E) (рис. 6.18).

З рис. 6.16 видно, що 13 – 15 травня 2019 р. мінімальна спостережувана на іонограмі частота  $f_{\min}$  змінювалася в межах 1.2 – 1.8 МГц, критична для звичайної радіохвилі частота Е області  $f_oE$ , як і слід було очікувати, зазнавала добових варіацій. Критична для звичайної радіохвилі частота спорадичного шару  $E_s f_oE_s$  у день бурі змінювалася незначно (від 3 до 6 МГц). Критична для звичайної радіохвилі частота шару F2  $f_oF_2$  до 06:00 перебувала в межах 4 – 5 МГц, а в інтервалі часу 06:00 – 11:00 14 травня 2019 р. вона спочатку збільшувалася від 5 до 7.8 МГц, а потім зменшувалася до 3 МГц. Діюча висота області Е  $h'E$  протягом 13 – 15 травня 2019 р. знаходилася в межах 105 – 110 км. Діюча висота шару  $E_s$   $h'E_s$  суттєво збільшилася від 110 км до 170 км близько 07:00 14 травня 2019 р. Діюча висота шару F2  $h'F_2$  значно збільшилася (від 270 км до 400–410 км) приблизно з 00:00 до 08:00 14 травня 2019 р.



**Основні параметри іоносфери та радіохвиль**

$f$ (кГц)	5000	6015	6055	6600	7260
$z_{r0}$ (км)	100	120	110	125	125
$\theta_0$ (град)	75	71	69	66	64
$\Delta f_D$ (Гц)	-0.7	-0.7	-1.2	-0.9	-
$\Delta T$ (хв)	40	30	50	45	-
$\Delta z_r$ (км)	148	53	183	81	180
$2H$ (км)	80	25	100	60	60
$T_1$ (хв)	-	-	-	5	15
$f_{Da1}$ (Гц)	-	-	-	0.1	0.05
$\delta_{Na1}$ (%)	-	-	-	0.7	1
$T_2$ (хв)	20	20	20	20	30
$f_{Da2}$ (Гц)	0.20 – 0.25	0.1	0.20 – 0.25	0.15	0.1
$\delta_{Na2}$ (%)	6 – 7.5	8	4 – 5	4.5	4.1

Як видно з рис. 6.17, на іонозонді Хабаровськ також відзначався суттєвий ріст  $f_oF_2$  в інтервалі часу 06:00 – 12:00 14 травня 2019 р. Висота максимуму іонізації  $h_mF_2$  з 05:30 до 08:00 збільшувалася від 250 км до 300 – 320 км.

Таким чином, геокосмічна буря слабо вплинула на стан Е-області іоносфери, але суттєво позначилася на стані F-області іоносфери. Цим і пояснюються спостережувані варіації доплерівських спектрів.

Зауважимо, що магнітна буря була досить сильною, проте, іоносферна буря виявилася слабкою. При цьому  $N_{\max}/N_0 = (f_oF_{2\max}/f_oF_2)^2 \approx 2.5$ . Причиною слабкості

іоносферної бурі служить відносно невелика ( $\sim 4 - 5$  год) тривалість магнітної бурі.

### 6.3.5 Рух області відбиття

Різке зменшення доплерівського зміщення частоти після настання іоносферної бурі свідчило про рух області відбиття радіохвиль вгору.

Співвідношення з роботи [360] використовувалися при розрахунку величини  $\Delta z_r$ , наведеної в табл. 6.1. Із табл. 6.1 видно, що  $\Delta z_r$  для різних радіотрас змінювалась приблизно від 50 до 180 км.

Оцінки  $\delta_{Na}$  за співвідношеннями [360] наведені в табл. 6.1. Видно, що для різних радіотрас значення  $\delta_{Na}$  змінювалися від 4% до 8% при  $T = 20 - 30$  хв. Такі параметри властиві атмосферним гравітаційним хвилям, які, поширюючись в іоносфері, модулюють концентрацію електронів. При радіозондуванні прояви атмосферних гравітаційних хвиль сприймаються як рухомі іоносферні збурення.

### 6.3.6 Параметри хвильових збурень

Амплітуди  $\delta_{Na}$  відносних збурень концентрації електронів  $N$  оцінювалися зі співвідношення з роботи [360].

Коливання з періодом  $T < 5$  хв пов'язані з поширенням в іоносфері довгоперіодного інфразвуку. Його прояви спостерігалися, наприклад, на частоті 6600 кГц (див. рис. 6.13). При  $T \approx 5$  хв,  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц, а  $\delta_{Na} \approx 0.7\%$ .

## 6.4 Ефекти геокозмічної бурі в середній і зовнішній іоносфері

Ефекти ряду геомагнітних бур у широкому діапазоні висот ( $\sim 150 - 600$  км)

описані в роботі [359]. Порівняння іоносферних ефектів, які супроводжували ці магнітні бурі, дозволили розробити класифікацію іоносферних бур.

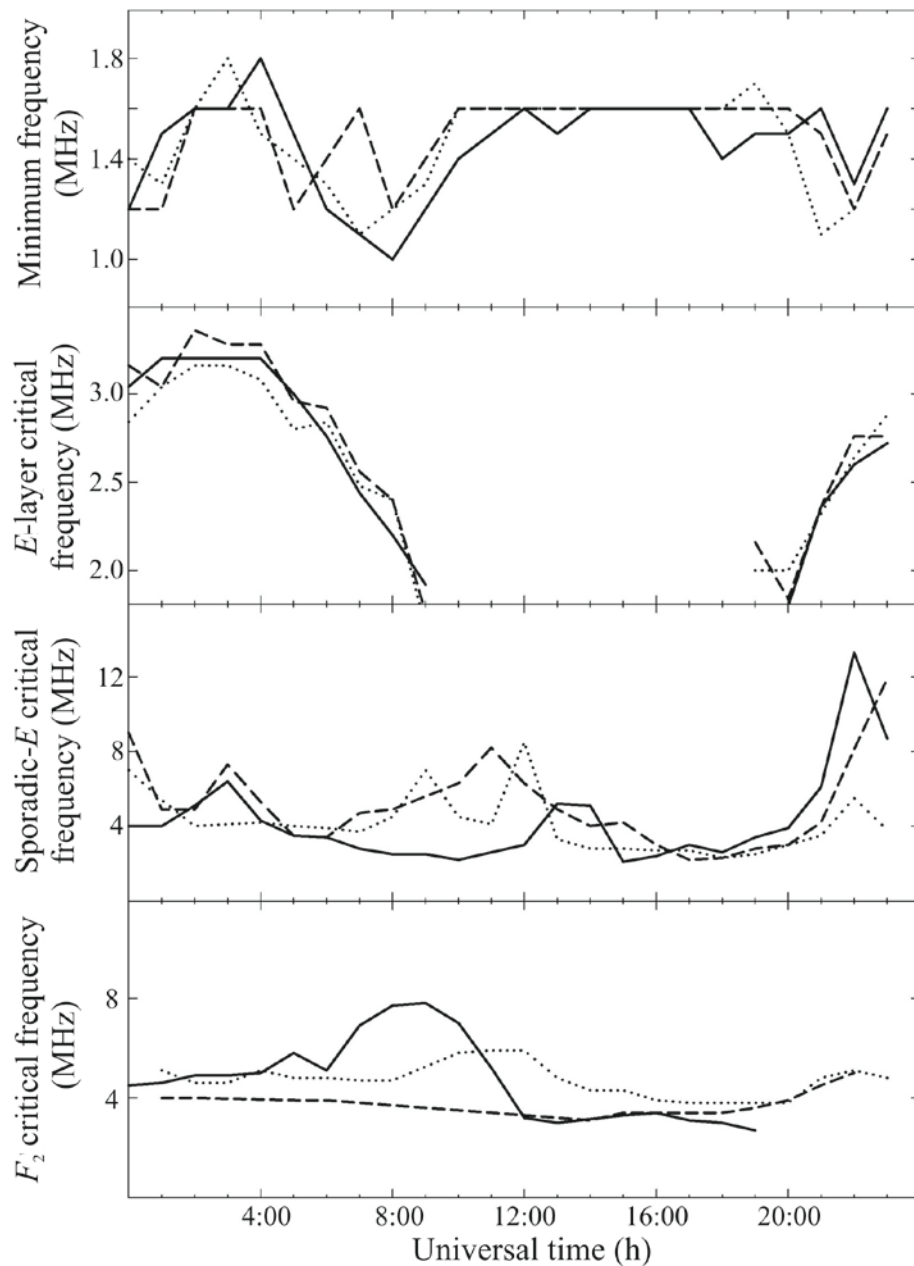


Рис. 6.16 Дані іонозонда в Wakkanai, Японія ( $45.39^{\circ}\text{N}$ ,  $141.68^{\circ}\text{E}$ ).  $f_{\min}$  – мінімальна частота, яка спостерігається на іонограмі,  $f_oE$  – гранична частота шару E,  $f_oE_s$  – гранична частота спорадичного шару E,  $f_oF_2$  – гранична частота шару  $F_2$  для звичайної радіохвилі, на панелях згори донизу відповідно 13 – 15 травня 2019 р. (криві з крапок для 13 травня 2019 р.; суцільні криві для 14 травня 2019 р.; криві з тире для 15 травня 2019 р.). Дані отримані на [356]

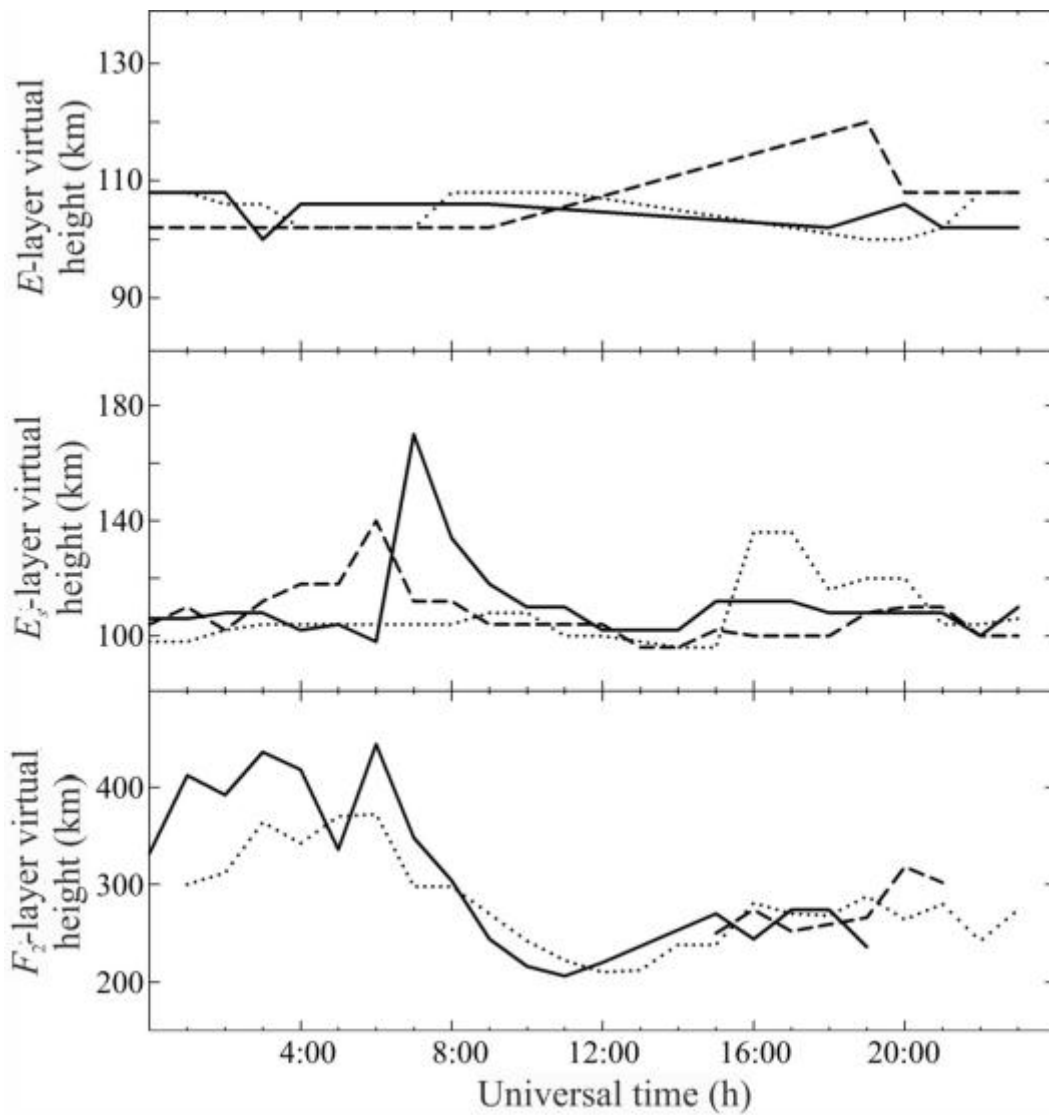


Рис. 6.17 Дані іонозонда в Wakkanai, Японія ( $45.39^{\circ}\text{N}$ ,  $141.68^{\circ}\text{E}$ ).  $h'E$  – уявна висота шару  $E$ ,  $h'E_s$  – уявна висота спорадичного шару  $E_s$ ,  $h'F_2$  – уявна висота шару  $F_2$ , відповідно. Криві з крапок для 13 травня 2019 р.; суцільні криві для 14 травня 2019 р.; криві з тире для 15 травня 2019 р. Дані отримані на [356]

#### 6.4.1 Магнітна буря 25 вересня 1998 р.

Сильна магнітна буря 25 вересня 1998 р. ( $D_{st} = -200$  нТл,  $K_p = 8+$ ) настала після сонячного спалаху M6/3B 23 вересня 1998 р. і була згенерована приходом міжпланетної ударної хвилі 24 вересня 1998 р. о  $\sim 23:00$  UT (рис. 6.19). Сильна негативна іоносферна буря розпочалася незабаром після 01:00 UT 25 вересня

1998 р. і тривала принаймні до кінця вимірювальної кампанії. Бура супроводжувалася зменшенням електронної концентрації в максимумі іоносферного шару  $F_2$  ( $N_mF_2$ ) під час основної фази бурі в 3–3.5 рази та підняттям шару  $F_2$  на 100 км вночі та на 50 км близько опівдня (рис. 6.20).

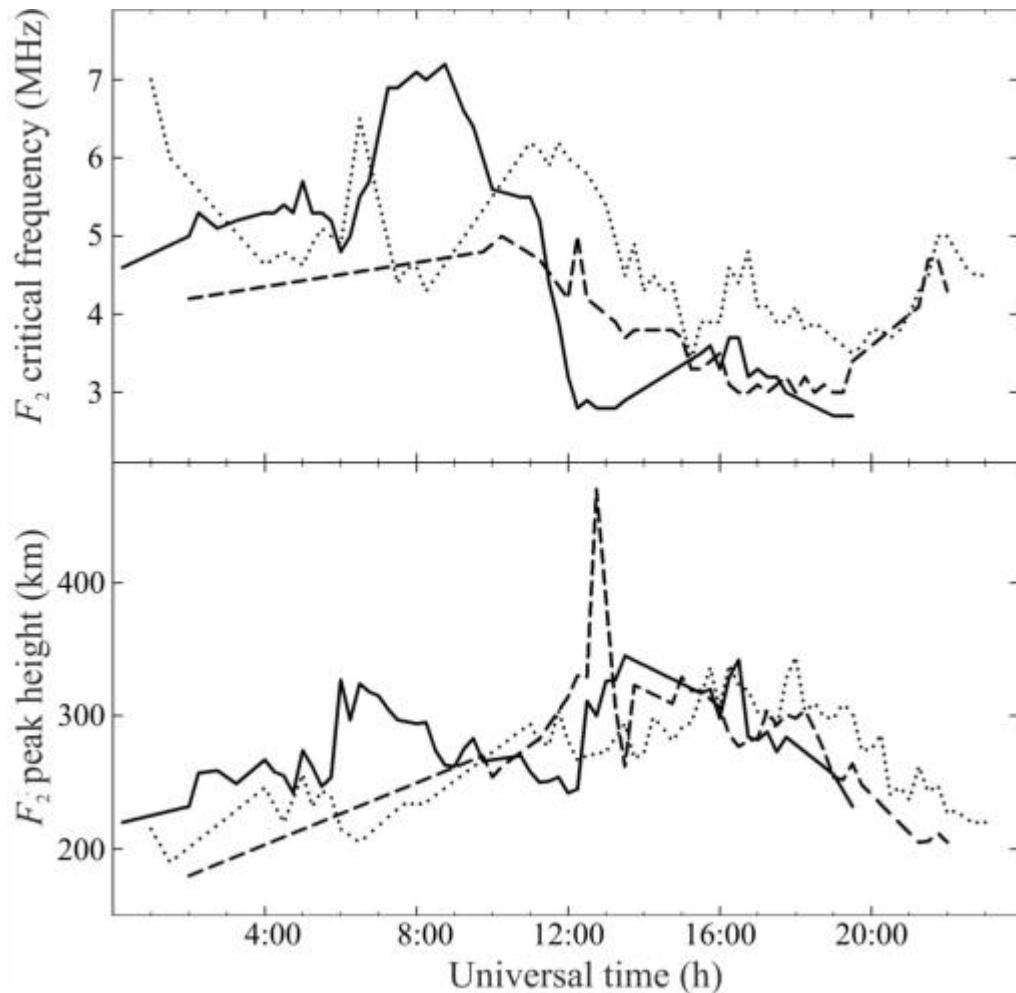


Рис. 6.18 Дані іонозонда в місті Хабаровськ, Російська Федерація ( $47.52^{\circ}\text{N}$ ,  $134.77^{\circ}\text{E}$ ).  $f_oF_2$  – критична частота шару  $F_2$  для звичайної радіохвилі (верхня панель) та  $h_mF_2$  – висота максимуму шару  $F_2$  (нижня панель). Криві з крапок для 13 травня 2019 р., суцільні криві для 14 травня 2019 р., криві з тире для 15 травня 2019 р. [Дані отримані на:

<https://lgdc.uml.edu/common/DIDBYearListForStation?ursiCode=KB547>]

Аналіз показав, що однією з причин зменшення  $N_mF_2$  може бути зміщення у напрямку екватора головного іоносферного провалу. Цей висновок підтверджено

аналізом глобальних карт повного електронного вмісту, отриманих на сітці приймачів GPS.

На рис. 6.20 показана максимальна концентрація в максимумі іоносферного шару  $F_2$  ( $N_m F_2$ ) удень та висоти максимумів шарів  $F_2$  та  $F_1$ , за вимірювань харківським радаром некогерентного розсіяння (НР) під час магнітної бурі 25 вересня 1998 р. На рис. 6.21 представлені вертикальний дрейф плазми  $V_z$ , та оцінка вертикальної складової швидкості дифузії  $V_{dz}$ , меридіональної складової швидкості нейтрального вітру  $V_{nx}$  та швидкості  $W$ , яка враховує значення як електричного поля, так і ефектів нейтрального вітру на висоті 300 км.

#### 6.4.2 Магнітна буря 20–21 березня 2003 р.

Невелика магнітна буря 20–21 березня 2003 р. ( $D_{st} = -57$  нТл,  $K_p=5$ ) відбулася на фоні високої сонячної активності, але геоєфективність спалахів була низькою (рис. 6.22).

Іоносферна буря 20–21 березня 2003 р. сталася під час незначної геомагнітної бурі та мала двофазний характер, початкову позитивну фазу (збільшення  $N_m F_2$  у 1.5 рази) та подальшу глибоку негативну фазу (зменшення в  $N_m F_2$  в 5 разів, рис. 6.23 і 6.24). Аналіз події показав, що дестабілізуючий вплив імпульсу електричного поля та атмосферне збурення, що генерується магнітосферними суббурями, може бути причиною зміни фази іоносферної бурі, що сталася під час заходу Сонця.

Характерною особливістю цієї бурі є незвичне збільшення спрямованої угору швидкості дрейфу плазми в ранкові години 25 вересня 1998 р. до значення  $V_z \approx 50 \text{ м с}^{-1}$ , тоді як у спокійний день 23 вересня 1998 р.  $V_z \approx -25 \text{ м с}^{-1}$  (рис. 6.21). Показано, що збурення у  $V_z$  є спрямованим до екватору сплеском меридіональної складової нейтрального вітру  $V_{nx} \approx 270 \text{ м с}^{-1}$ , індукованого атмосферним збуренням, що преміщується та/або імпульсом електричного поля із зональною складовою спрямованою на схід  $E_y \approx 12\text{--}13 \text{ мВ м}^{-1}$ .

На рис. 6.23 показані зміни в часі відхилень критичних частот шару  $F_2$  від медіанних значень, в електронній концентрації в максимумі іоносферного шару  $F_2$

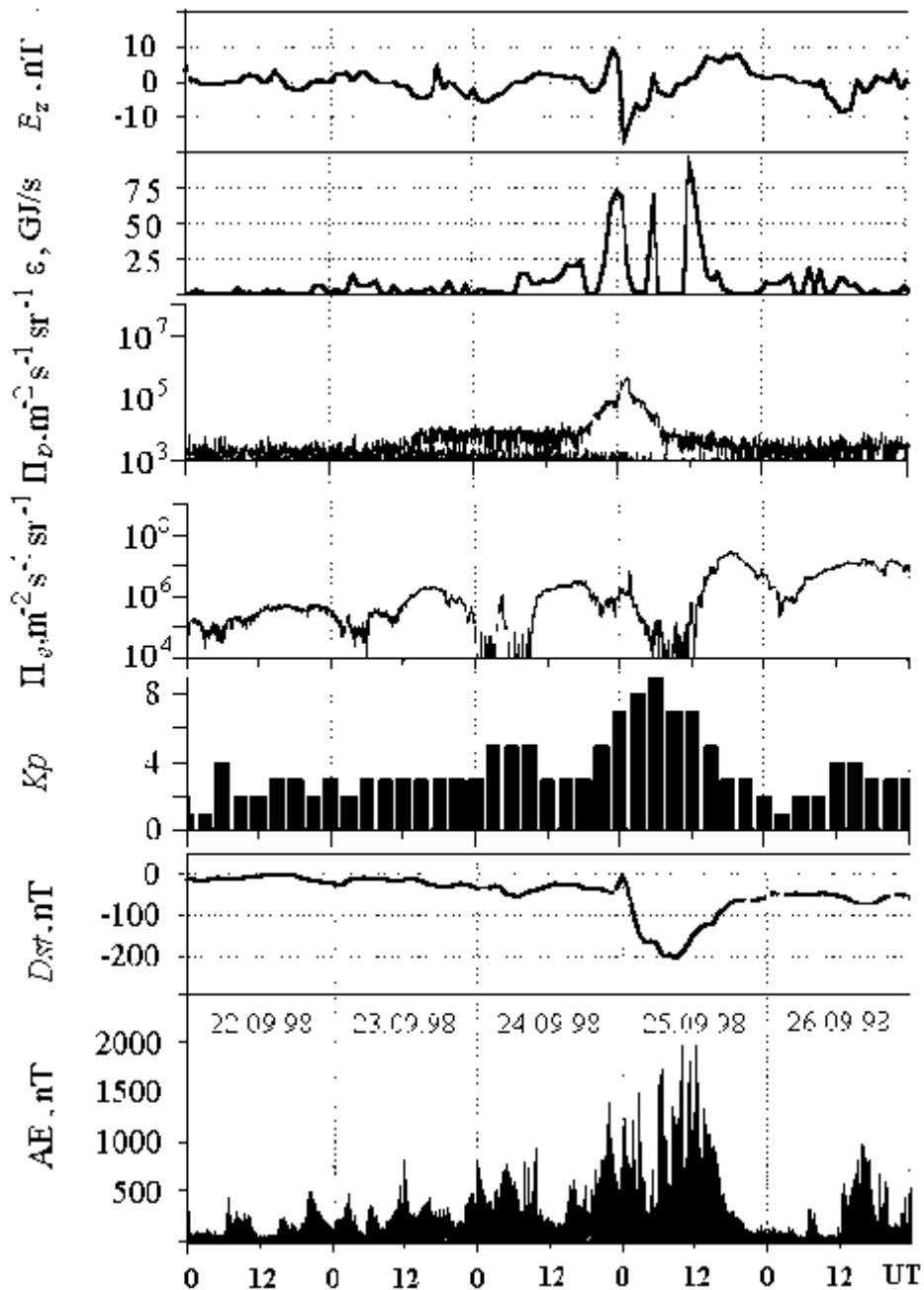


Рис. 6.19 Сонячно-геофізичні умови 22–26 вересня 1998 р.:  $B_z$ -компоненти ММП (магнітометр на супутникові ACE), функція Акасофу  $\epsilon_A$  (енергія, яка поступає від сонячного вітру в магнітосферу Землі за одиницю часу), потоки протонів  $\Pi_p$  (GOES 8 (W75)), потоки електронів  $\Pi_e$  (GOES 8), планетарний індекс  $K_p$  (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), щогодинні індекси  $D_{st}$  (WDC-C2 для геомагнетизму, Кіотський університет) та індекс  $AE$  (WDC Kyoto). Тут потоки протонів представлені з енергіями, що перевищують 10, 50 і 100 MeV, а потоки електронів з енергіями більше 2 MeV

( $N_m F_2$ ), та висоті максимуму шару  $F_2$  ( $h_m F_2$ ) до, під час та після магнітної бурі 20–21 березня 2003 р. На рис. 6.24 представлені варіації електронної концентрації

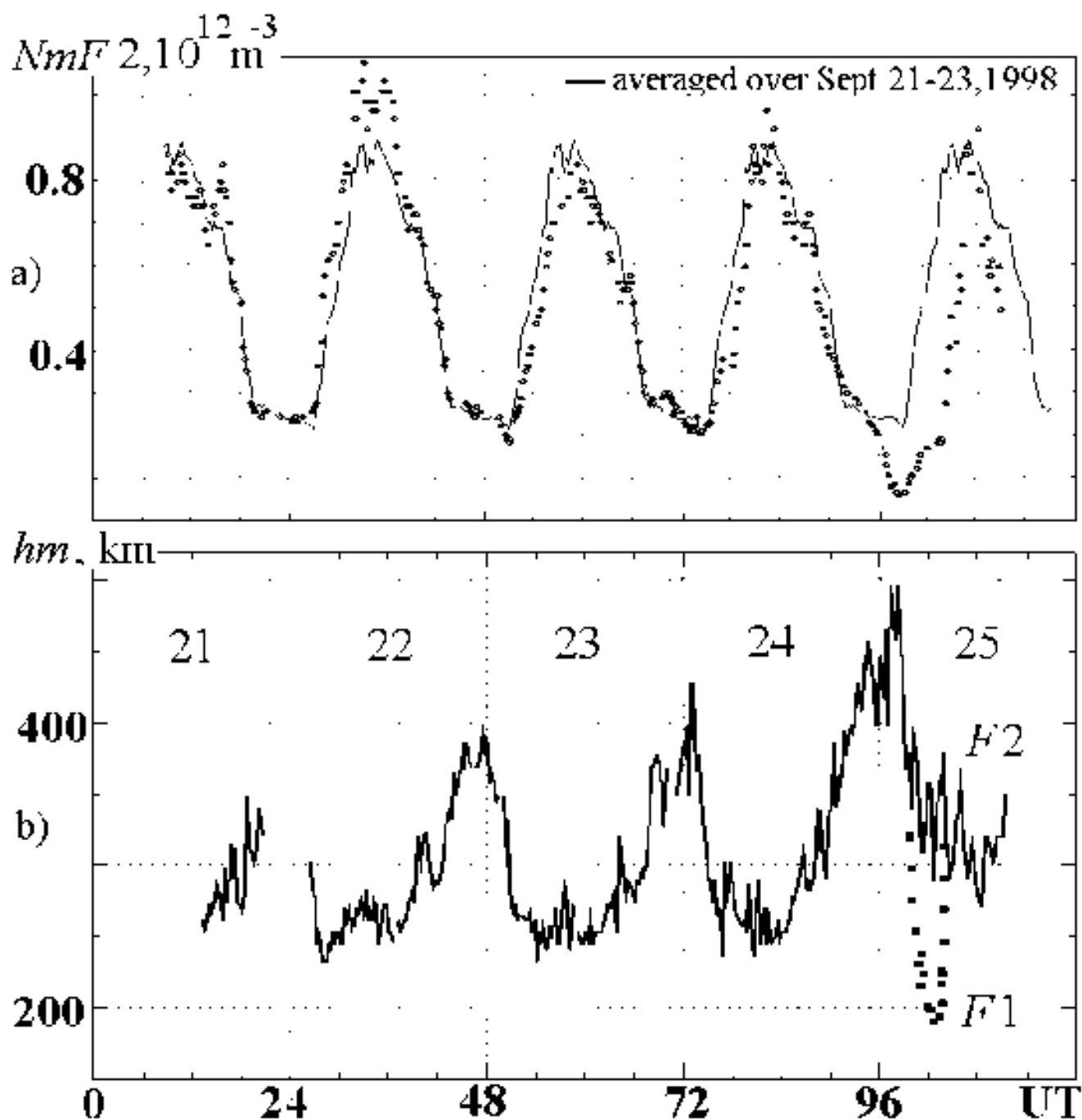


Рис. 6.20 Часові варіації (а) електронної концентрації в максимумі іоносферного шару  $F_2$  ( $N_m F_2$ ) та (б) висоти  $h_m$  над харківським НР 21–25 вересня 1998 р., починаючи з півночі 21 вересня (висоти  $h_m$  менше 200 км відносяться до висоти максимуму  $F_1$ -шару).  $LT \approx (UT + 02:25)$



( $\lg N_e$ ), температур електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$  та вертикального дрейфу плазми  $V_z$ .

Позитивна фаза бурі 20 березня 2003 р. тривала приблизно 6 год, і це могло бути спричинено посиленням екваторіальним меридіональним вітром, пов'язаним із високоширотним термосферним нагріванням (рис. 6.24).

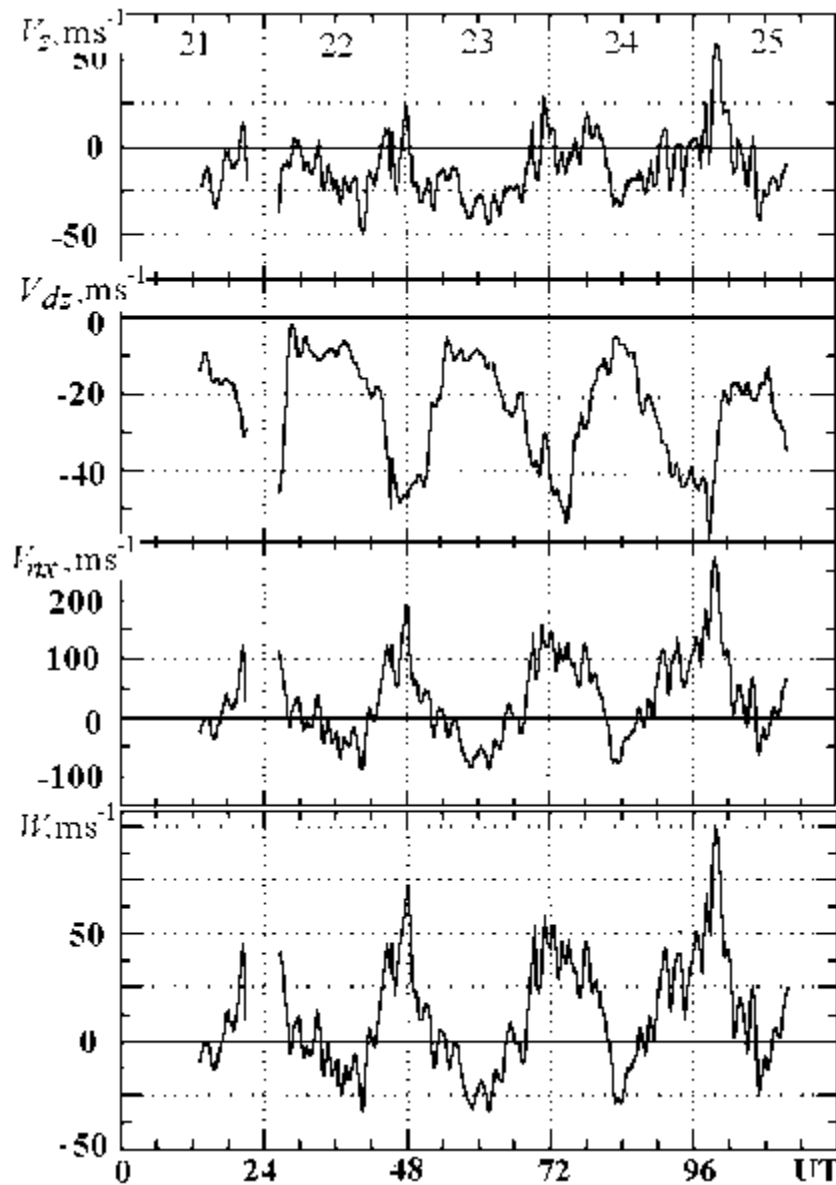


Рис. 6.21 Виміряна вертикальна швидкість дрейфу плазми  $V_z$  (радіолокаційні дані, отримані 21–25 вересня 1998 р.) та розрахована вертикальна складова швидкості за рахунок дифузії  $V_{dz}$ , меридіональна складова нейтральної швидкості вітру  $V_{nx}$  та швидкість  $W$ , що враховує вплив електричного поля та нейтрального вітру на висоті 300 км

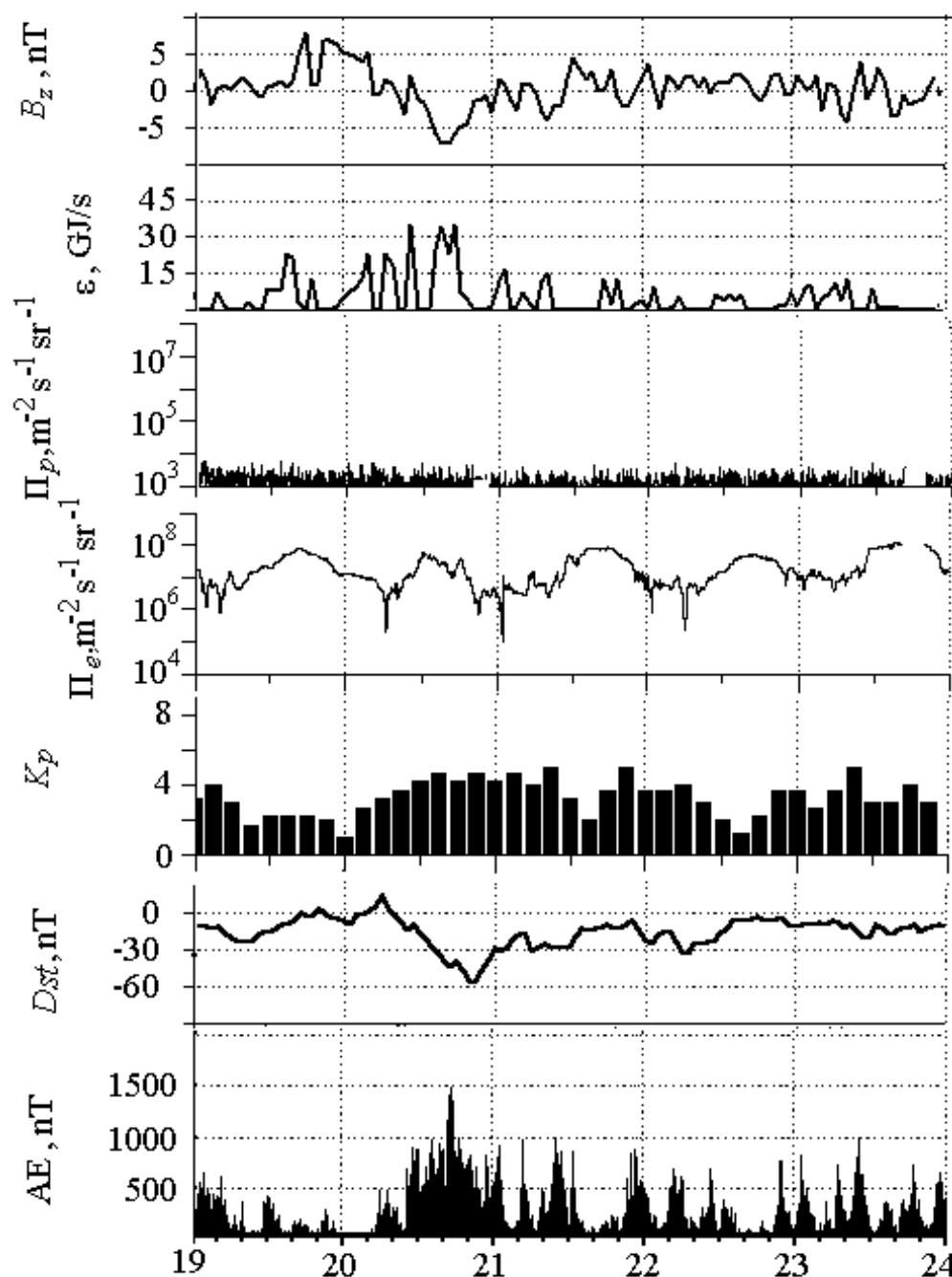


Рис. 6.22 Сонячно-геофізичні умови 19–23 березня 2003 р.

#### 6.4.3 Магнітна буря 29–30 травня 2003 р.

Ця сильна магнітна буря ( $D_{st} = -108$  нТл,  $K_p = 8+$ , рис. 6.25) була спричинена приходом двох міжпланетних ударних хвиль від спалахів X1.3 та X3.6 27–29 травня 2003 р.

Магнітна буря супроводжувалася зменшенням  $N_mF_2$  у 4 рази, незвичайним нагріванням плазми вночі 29–30 травня 2003 р., підняттям шару  $F_2$  іоносфери на 160 км вночі та на 70 км близько опівдня, та зменшення співвідношення  $N(H^+)/N$  більше, ніж на порядок (рис. 6.23, 6.26). Однією з причин цих явищ може бути зміщення головного іоносферного провалу, провалу легких іонів та підвищених температур електронів, пов'язаних з тепловим явищем субавроральними червоними дугами, в напрямку до радіолокатору в Харкові (геомагнітна широта  $45.7^\circ$ ). Спрямований до екватора зміщення цих структур опосередковано підтверджено максимальними значеннями рівня полярного сяйва POES, рівними 10 [<http://www.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>], що може свідчити про зміщення полярного овалу в напрямку до екватора до геомагнітних широт близько  $51\text{--}45^\circ$ . Таким чином, харківський радар можливо знаходився у провалі близько опівнічного сектору під час головної фази бурі.

Варіації електронної концентрації ( $\lg N_e$ ), температур електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$ , відносної концентрації іонів водню  $N(H^+)/N_e$  та вертикальної складової швидкості дрейфу плазми  $V_z$  представлені на рис. 6.26 під час бурі 29–31 травня 2003 р. На рис. 6.26 показані вертикальні профілі електронної концентрації  $N_e$ , отримані на світанку з інтервалом у 15 хв у збурений день 30 травня 2003 р.

Геомагнітна буря супроводжувалась сильною негативною іоносферною бурею, коли під час головної фази бурі спорожнення  $N_mF_2$  зросло в 4 рази. Незвичайне нагрівання плазми спостерігалось у ніч з 29 на 30 травня 2003 р., коли температура іонів та електронів зросла до денних значень 1200–2400 К на висоті 300 км та 2000–3200 К на висоті 800 км, тоді як за спокійних умов значення цих температур становили близько 800 К вночі.

#### 6.4.4 Магнітні бурі 7–10 листопада 2004 р.

Прояв магнітної бурі 7–10 листопада 2004 р. в нижній іоносфері було розглянуто в підрозділі 6.2.

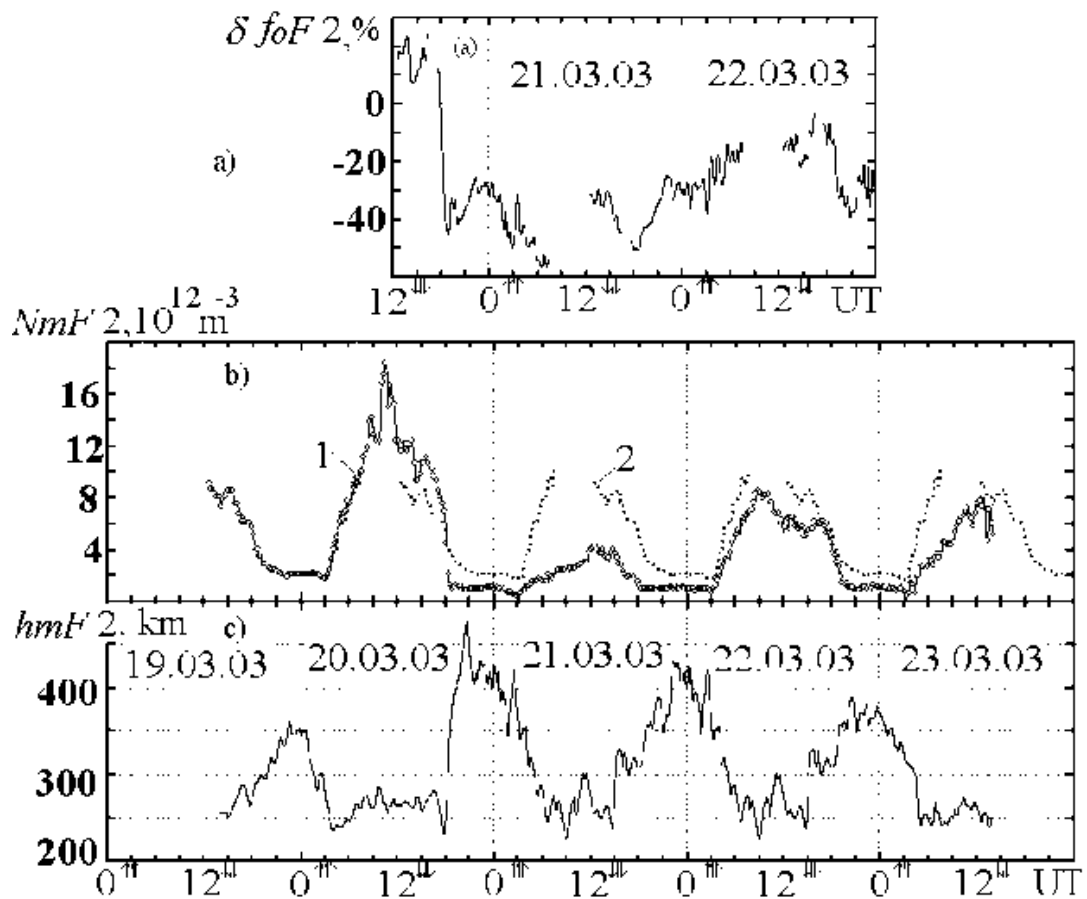


Рис. 6.23 Часові варіації (а) відхилення критичної частоти  $f_oF_2$  шару  $F_2$ , яку виміряно на харківському іонозонді під час двофазної бурі 20–22 березня 2003 р., від даних отриманих в контрольний день; (б) максимальних концентрацій  $N_mF_2$  іоносферного шару  $F_2$ , розрахованих за період 19–23 березня 2003 р. за даними харківського іонозонду (крива 1) та розрахованих за даними іонозондів в контрольний день 19 березня 2003 р. у Сан-Віто за інтервал 00:00–07:30 UT та в Харкові за інтервал 12:30–24:00 UT (крива 2); (с) висоти максимумів  $h_mF_2$  шару  $F_2$  іоносфери за даними харківського радару некогерентного розсіяння. LT  $\approx$  (UT + 02:25)

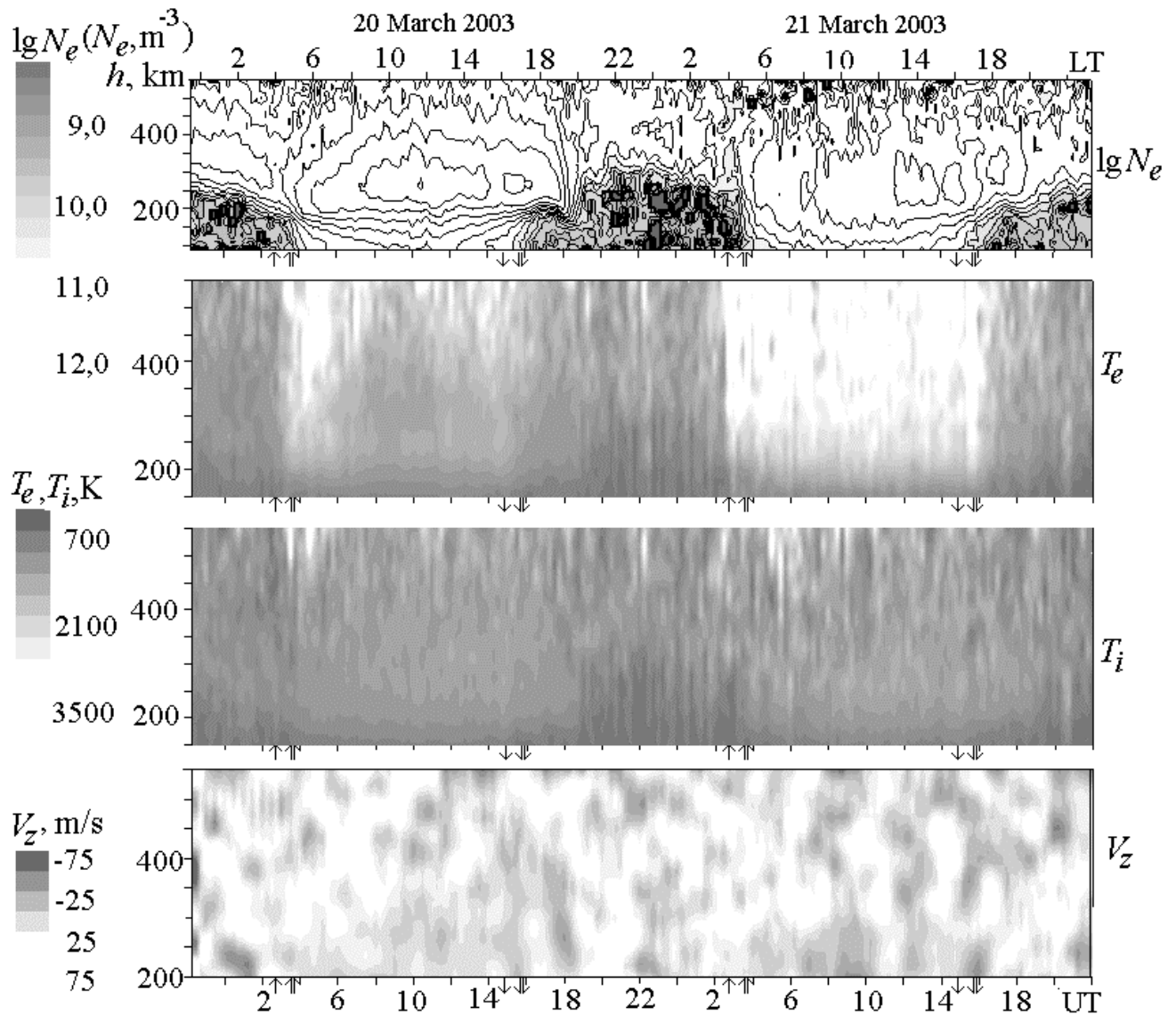


Рис. 6.24 Часові варіації параметрів іоносфери 20–21 березня 2003 р.: електронної концентрації ( $\lg N_e$ ), температури електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$  і вертикального дрейфу плазми  $V_z$

Ця магнітна буря представляє послідовне виникнення двох великих магнітних збурень 7–8 листопада 2004 р. та 9–10 листопада 2004 р. ( $D_{st} = -373$ ,  $-289$  нТл,  $K_p = 8+$ ,  $9-$ , відповідно, рис. 6.27).

На рис. 6.28 показані коливання електронної концентрації в часі, температур електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$ , відносної концентрації іонів водню  $N(H^+)/N_e$ , як це спостерігалось 8–13 листопада 2004 р.

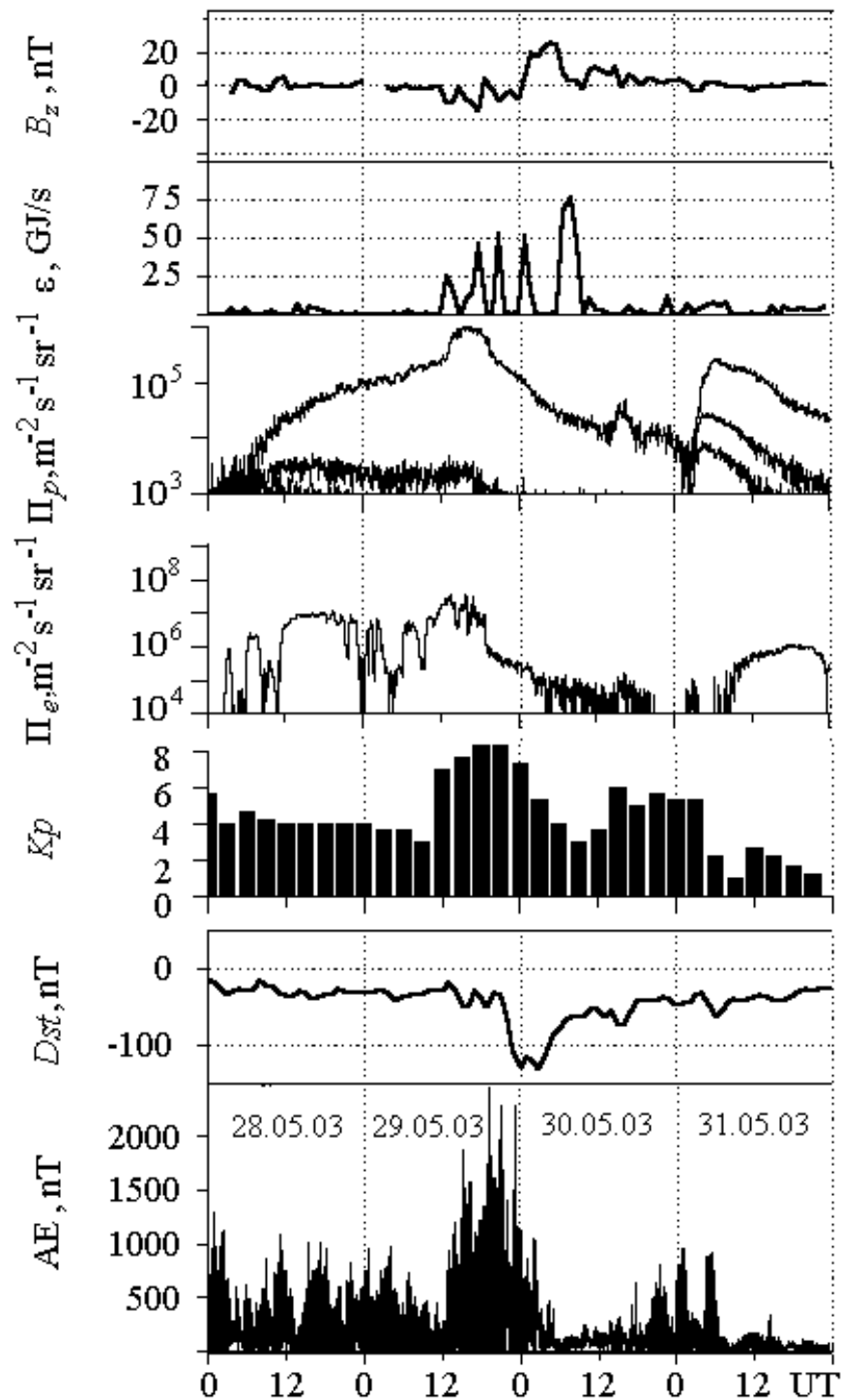


Рис. 6.25 Сонячно-геофізичні умови 28–31 травня 2003 р.

Основні особливості сильної негативної іоносферної бурі 7–10 листопада 2004 р. включають зменшення електронної концентрації в 6–7 разів, підняття шару  $F_2$  іоносфери на 300 км вночі та на 150–180 км вдень, незвичне нагрівання плазми вночі та зменшення співвідношення  $N(H^+)/N_e$  до 3,5 разів через спороження трубки магнітного потоку, що проходить через харківський радар.

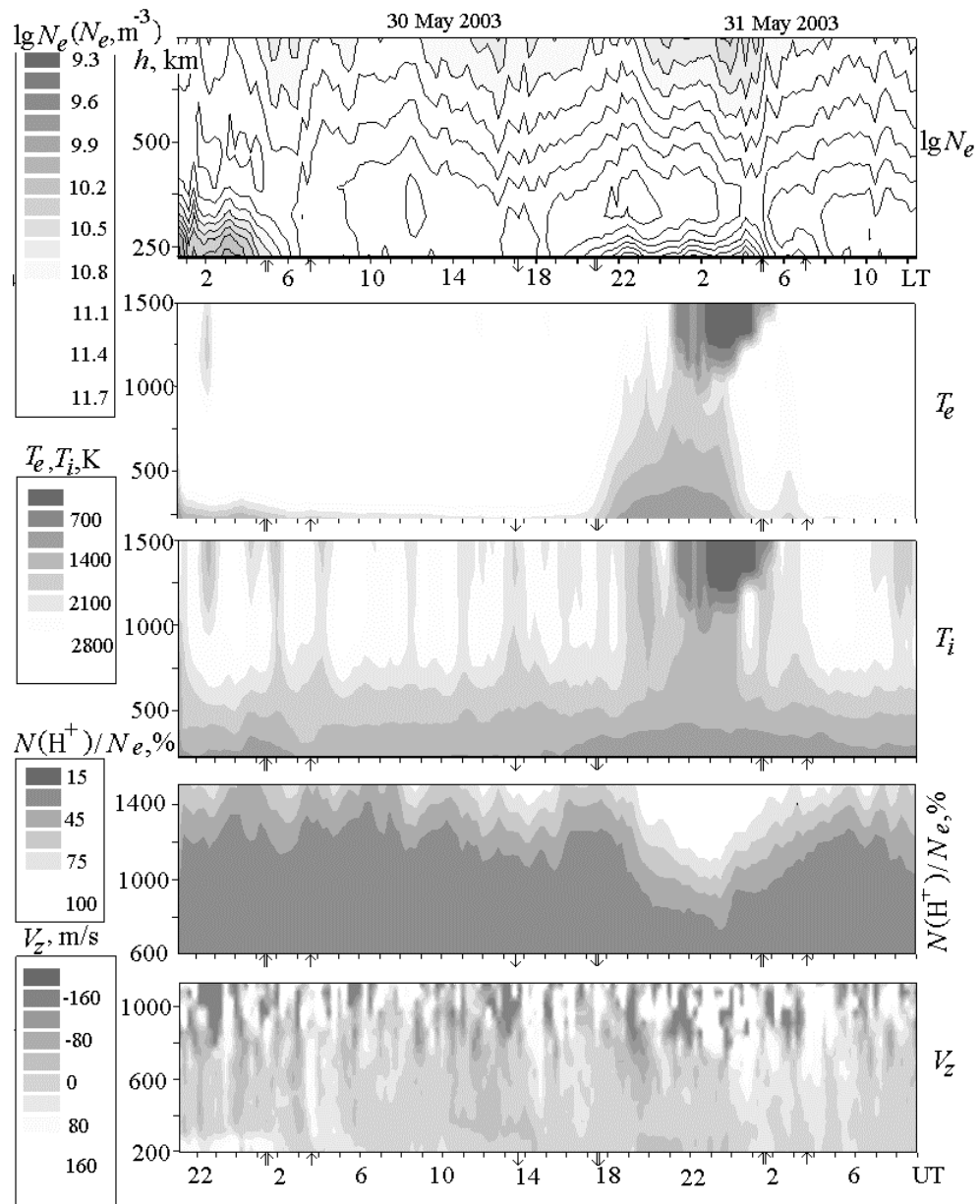


Рис. 6.26 Часові варіації параметрів іоносфери 29–31 травня 2003 р.: електронна концентрація ( $\lg N_e$ ), температури електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$ , відносна концентрація іонів водню  $N(H^+)/N_e$ , та вертикальна складова швидкості дрейфу плазми  $V_z$ .  $LT \approx (UT + 03:25)$ . На цьому рисунку стрілки біля вісі абсцис вказують на моменти сходу Сонця (вгору) та заходу Сонця (вниз) у Харкові (подвійні) та в магнітно-сполученій точці (одинарні) на поверхні Землі. Магнітно-сполучена точка Харкова розташована в околицях Мадагаскару

Під час основної фази бурі 9–10 листопада 2004 р. ефекти, що спостерігались харківським радаром, були характерними для високоширотної іоносфери, яка включає когерентне зворотне розсіяння при похилому падінні навіть у денний

час. Ці спостереження можуть опосередковано продемонструвати зміщення у бік поля зору радіолокатора поблизу м. Харкова, великомасштабних структур високоширотної іоносфери в напрямку до екватору, включаючи полярний овал, головний іоносферний провал, провал легких іонів та підвищені температури електронів – тепловий феномен пов’язаний з субавроральною червоною дугою.

Опорожнення  $N_mF_2$  у 7 разів під час головної фази бурі сталося 8 листопада 2004 р. 11 листопада буря почала стихати, поступове відновлення  $N_mF_2$  тривало до кінця вимірювань.

Під час бурі внесок дифузійних процесів в іоносферні вертикальні профілі концентрації  $N_e$  змінювався з висотою.

Таким чином, досліджувані іоносферні бурі можна розділити на три групи.

Сильні іоносферні бурі, що супроводжують сильні магнітні бурі ( $K_p \geq 8$ ), утворюють першу групу. Такі магнітні бурі відбувалися 25 вересня 1998 р., 29–30 травня 2003 р. та 7–10 листопада 2004 р. (Індекси  $K_p$  досягли максимальних значень 8+, 8+, 9–). Вони мали тривалі (6–12 год) періоди високої геомагнітної активності ( $K_p \geq 8$ ), мінімум в індексі  $D_{st}$  досягав –210, –131 та –383 нТл відповідно. Величина енергії, що нагнітається сонячним вітром у магнітосферу Землі за одиницю часу для цієї групи магнітних бур, була значною,  $\varepsilon_A \geq (75–550)$  ГДж/с. Магнітні бурі розпочиналися і вночі, і вдень. Важливо, що основна фаза бур розвивалася швидко, з максимальними значеннями похідної  $|D_{st}/dt| = 35–65$  нТл год<sup>–1</sup>. У цей час харківський радар знаходився в секторах від опівночі до ранку. Іоносферні бурі, що супроводжували ці магнітні бурі, характеризуються значними збуреннями, які рідко трапляються в середньоширотній іоносфері. Порушення включають зменшення електронної концентрації в 3.5–7 разів, підняття шару  $F_2$  іоносфери вночі до 150–300 км і на 100–180 км вдень, незвичне нічне нагрівання плазми до 2400–3200 К, збільшення нейтральної температури більш ніж на 200 К, підвищення температури



термосфери до висот не менше 400 км та суттєве зменшення вмісту іонів водню  $N(H^+)/N_e$  під час головної фази бурі з подальшим його збільшенням на фазі відновлення. Однією з причин цих збурень може бути зсув таких структур полярних областей, як головний іоносферний провал, провал легких іонів та підвищені температури електронів, пов'язаних із зміщенням субавроральних червоних дуг до середніх широт, де розташований харківський радар, на геомагнітній оболонці  $L \approx 1.9$  глибоко всередині внутрішньої плазмосфери.

Під час основної фази магнітної бурі 9–10 листопада 2004 р. ( $K_p = 9$ ) спостерігалось когерентне зворотне розсіювання на похилих трасах  $R \approx 400$  та 650–1200 км, які є більш типовими для високоширотної іоносфери. Така рідкісна подія була зареєстрована 10 листопада 2004 р. навіть у денний час, коли індекс  $D_{st}$  досяг мінімуму  $-289$  нТл. Слід також зазначити, що профілі  $N_e(h)$  на фоні когерентного зворотного розсіювання супроводжувались явищем F-spread на іонограмах над харківським радаром. Когерентне зворотне розсіювання при похилому падінні може бути спричинено розсіюванням радіолокаційних сигналів дрібномасштабними неоднорідностями електронної густини орієнтованими повздовж магнітного поля, і які виникають внаслідок двопотокової або/та градієнтно-дрейфової нестабільності в іоносферній плазмі на висотах області E поблизу екваторіальної межі полярного овалу, зміщеної до середніх широт.

Іоносферні ефекти, що виникають під дією перехідних магнітосферних електричних полів, що проникають до середніх широт, та енергійних частинок, що висипаються з магнітосфери, спостерігалися під час розглянутих бур.

До другої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжували помірну магнітну бурю 20–21 березня 2003 р. ( $Kp_{\max} = 5$ ). Магнітна буря була реакцією геомагнітного поля на введення невеликої кількості енергії сонячного вітру в магнітосферу, функція Акасофу  $\varepsilon_A \approx 35$  ГДж/с. Магнітна буря розпочалася

о 04:45 UT, основна фаза розвивалася повільно ( $|D_{st}/dt| \approx 5$  нТл год $^{-1}$ ) і досягла мінімуму  $D_{st} = -57$  нТл о 20:00 UT. Іоносферна буря мала двофазний характер і

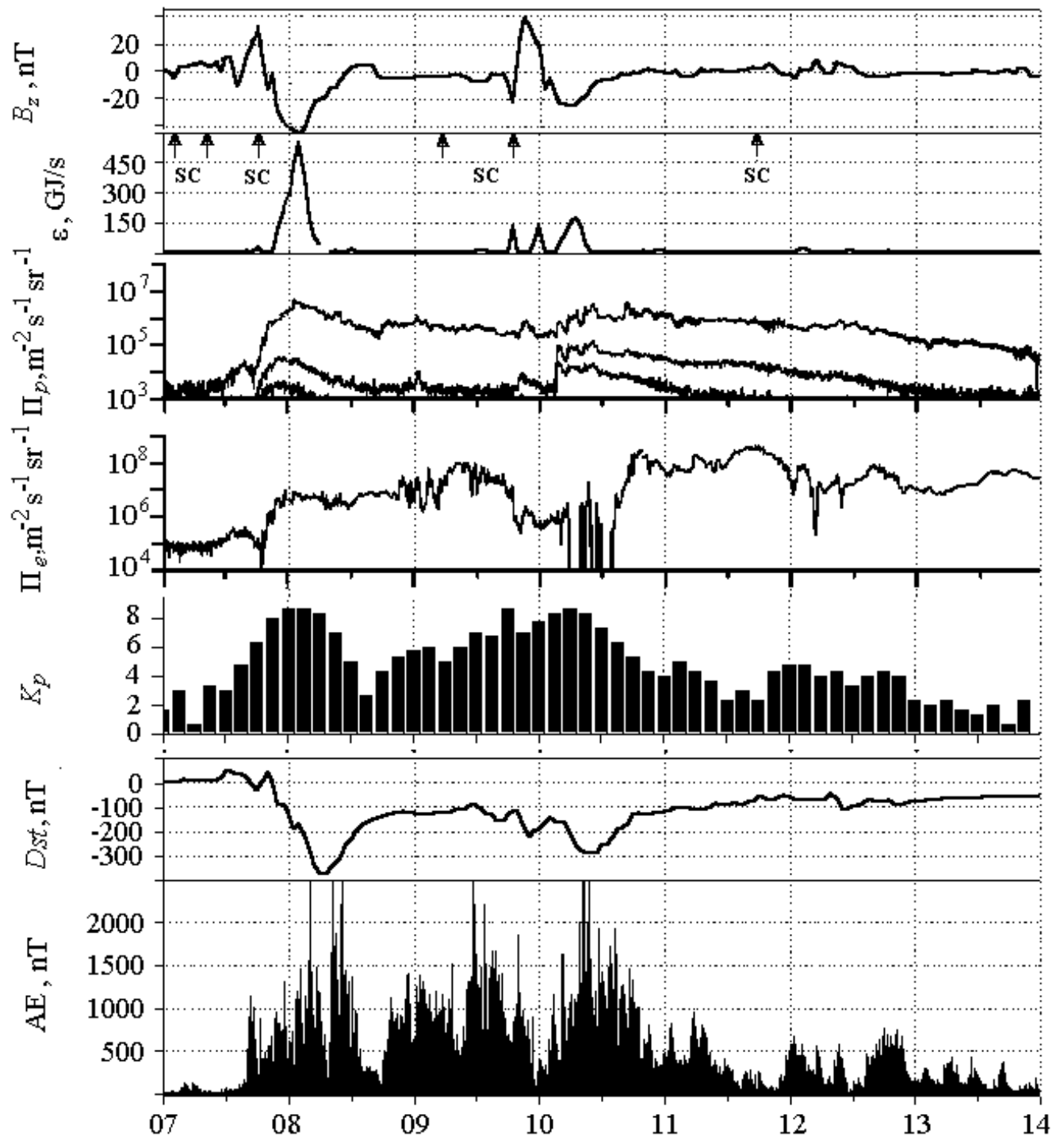


Рис. 6.27 Сонячно-геофізичні умови 7–13 листопада 2004 р. Стрілки біля вісі абсцис позначають моменти раптового початку бурі (SC)

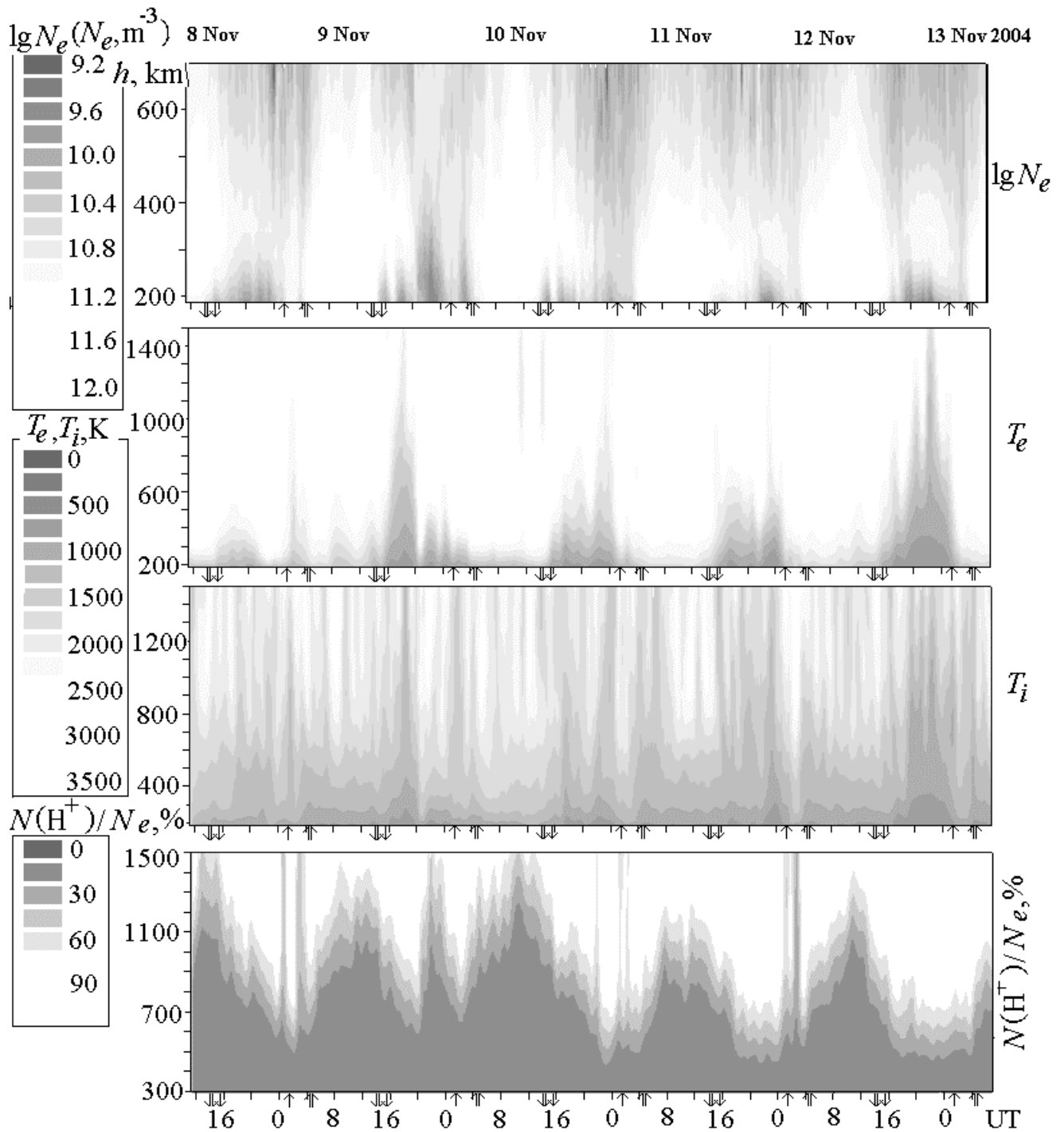


Рис. 6.28 Часові варіації логарифму електронної концентрації  $\lg N_e$  (наведені без згладжування), температури електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$ , відносної концентрації іонів водню  $N(H^+)/N_e$  (усереднені за інтервали 75 хв з кроком 15 хв) 8–13 листопада 2004 р.

розпочалася з позитивної фази. Однак характерною особливістю цієї бурі було те, що її негативна фаза, що відбулася на фоні низької геомагнітної активності, характеризувалася дуже великими іоносферними збуреннями: зменшення  $N_m F_2$  в

5 разів, підвищення температури електронів до 2400–3500 К на висотах 300–500 км, і підняття шару  $F_2$  більш ніж на 100 км протягом ночі з 20 на 21 березня 2003 р. та біля сходу Сонця. Змінення фази бурі відбулося менш ніж за годину біля сутінків і, мабуть, було спричинене суперпозицією ефектів двох дестабілізуючих факторів, породжених магнітосферними суббурями: проходження рухомого атмосферного збурення та індуковане бурею електричне поле, що проникає у внутрішню магнітосферу та іоносферу над Харковом, компонента  $E_y$ , якого змінила напрямок із західного на східний і значення від  $-10$  до  $+15$  мВ м $^{-1}$ .

Отримані дані показують, що інтенсивність геомагнітних збурень (25 вересня 1998 р. та 29–30 травня 2003 р., індекс  $K_p$  приблизно дорівнював 8) можуть супроводжуватися явищами, що рідко зустрічаються в середніх широтах (наприклад, зменшення електронної концентрації у 7 разів, підняття іоносферного шару  $F_2$  вночі на величину до 300 км, а вдень 180 км, незвичайне нагрівання електронів та іонів плазми вночі до денних температур, зменшення концентрації іона водню більше, ніж на порядок величини, когерентне зворотне розсіяння при похилому падінні тощо), які можуть бути пов'язані зі зміщенням структур в полярних областях в напрямку до екватора. Ці збурення можуть спричинити значні зміни в структурі середньоширотної області іоносфери F та теплових й динамічних режимах заряджених і нейтральних компонентів верхніх шарів атмосфери Землі.

Спостереження та моделювання динамічних процесів в іоносфері показують, що навіть незначна геомагнітна буря (така, як та, що трапилась 20–21 березня 2003 р.,  $K_p = 5$ ) здатна викликати сильну негативну іоносферну бурю, що супроводжується значними варіаціями параметрів іоносфери в середніх широтах. Зміна фаз бурі може бути спричинена накладанням двох дестабілізуючих факторів: імпульсу електричного поля та атмосферного збурення, що рухається. Обидва фактори генеруються магнітосферними суббурями.

До третьої групи належать помірні іоносферні бурі, які супроводжуються сильними магнітними бурями.

Природно, що слабкі іоносферні бурі супроводжуються слабкими магнітними бурями, а відповідно сильні – сильними.

## Висновки до розділу 6

1. Аналіз часових варіацій електронної концентрації на висотах 73.5 –82.5 км під час дуже сильної геокоосмічної бурі 7–11 листопада 2004 р. виявив збільшення її середніх значень (на 50–100%) та амплітуд її варіацій (у деяких сплесках в 3–5 разів) у магнітозбурені дні. Значення хвильових збурень у відносних амплітудах протягом бурі зазвичай становили 0.05–0.15, а під час другого магнітного збурення (10 листопада 2004 р.) спостерігалось невелике збільшення їх значень. Чіткого зв'язку між рівнем магнітної активності та параметрами хвильових збурень у нижній іоносфері не виявлено.

Зафіксовано значне (на порядок і більше) збільшення варіацій і стандартних відхилень горизонтальних складових магнітного поля в магнітозбурені періоди 7–14 листопада 2004 р. Спостерігались сплески пульсацій Pc5–6 з амплітудами, що досягали 30 та 50 нТл для *H*- і *D*-компонент відповідно. Протягом деяких проміжків часу мав місце взаємозв'язок між пульсаціями Pc5–6 та короткочасними (5–15 хв) хвильовими збуреннями електронної концентрації нижньої іоносфери. Ця взаємодія може бути спричинена як стимуляцією магнітними пульсаціями квазіперіодичного середньопісиротного висипання електронів з магнітосфери так і генерацією пульсацій Pc5–6 і атмосферних гравітаційних хвиль в полярних районах і їх поширенням до середніх і більш низьких широт.

2. Багаточастотні багатотрасові спостереження за динамікою іоносфери під час іоносферної бурі 14 травня 2019 р. дозволили встановити наступне. В інтервалі часу з 06:00 до 11:00 мала місце позитивна іоносферна буря. Встановлено, що  $f_oF_2$

при цьому збільшувалася від  $\sim 5$  до  $7 - 8$  МГц. Іоносферна буря призвела до зміщення вгору області відбиття радіохвилі в залежності від радіотраси на  $\sim 50 - 180$  км. Протягом бурі спостерігалися прояви атмосферних гравітаційних хвиль з періодом  $15 - 30$  хв. Амплітуда відносних збурень концентрації електронів становила  $4 - 8\%$ . Буря супроводжувалася генерацією інфразвуку з періодом близько  $5$  хв. При цьому амплітуда відносних збурень концентрації електронів була близько  $0.7\%$ .

3. Дослідження іоносферних бур у широкому діапазоні висот методом некогерентного розсіяння дозволило виявити позитивні та негативні іоносферні бурі, значне збільшення температури електронів, несуттєве збільшення температури іонів, значні варіації відносної концентрації іонів водню та динаміки іоносферної плазми. Запропонована нова класифікація іоносферних бур в залежності від геомагнітної обстановки. До першої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжують сильні магнітні бурі ( $K_p \geq 8$ ). До другої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжували незначні магнітні бурі ( $K_{p\max} = 5$ ). Природно, що помірні іоносферні бурі супроводжують помірні магнітні бурі. Важливо, що помірні іоносферні бурі можуть супроводжувати сильні магнітні бурі.

Основні результати, що наведені в даному розділі, відображені в роботах автора [278, 358–363].

## РОЗДІЛ 7

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ Й ІОНОСФЕРІ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ СТАРТИ РАКЕТ

#### 7.1 Загальні відомості

Останнім часом значна увага приділяється дослідженню збурень в іоносфері, викликаних стартами і польотами космічних апаратів (КА) (див., наприклад, [41, 234–237]). Основним результатом досліджень інших авторів є виявлення зменшення концентрації електронів  $N$  на десятки процентів у F-області з горизонтальним розміром  $L \sim 100 - 1000$  км (іоносферних дірок) і генерації хвиль густини, що мають швидкість  $v \sim 0.1-1$  км/с. Є підстави вважати, що збурення в іоносфері можуть носити не тільки локалізований ( $L \sim 10 - 100$  км), але і великомасштабний ( $L \sim 100 - 1000$  км) характер [29, 41].

Метою даного розділу є викладення результатів експериментальних досліджень глобальних збурень у нижній і середній іоносфері, викликаних стартами і польотами ракет.

У Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна зібрана база даних, що містить інформацію про наслідки стартів розгінних ступенів приблизно 5000 ракет і запусків двигуна підсистеми орбітального маневрування [29, 41, 235].

Пуски відбувалися з різних космодромів у всьому світі. Найближчими до Радіофізичної обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна є космодроми Плесецьк (Російська Федерація) та Байконур (Республіка Казахстан), які розташовані на відстані 1500 км та 2200 км відповідно.

#### 7.2 Фізичні процеси в нижній іоносфері, які супроводжували старти ракет

Для прикладу в якості джерела збурень у даному підрозділі обраний КА

«Space Shuttle», що стартував 15 травня 1997 р. о 08:07 UT з космодрому на мисі Канаверал (півострів Флорида, США).

КА рухався приблизно у південно-східному напрямку від космодрому. Через 44 хв, коли КА знаходився у східній частині Індійського океану на висоті близько 250 км, вмикались приблизно на 80 с корегувальні двигуни. Нахил орбіти складав  $57^\circ$ .

Стан іоносфери характеризувався як спокійний чи слабкозбурений (після 09:00 UT). Критична частота  $f_oF_2$  змінювалась від 4.2 до 5.1 МГц, мінімальна частота, що спостерігалась на іонограмах  $f_{\min} = 1.2\text{--}1.4$  МГц.

У відповідності з даними Центру космічного навколишнього середовища США збурень на Сонці не було, густина потоку радіовипромінювання із довжиною хвилі 10.7 см дорівнювала 73 Ян, число Вольфа  $W \approx 15$ . Геомагнітна активність класифікувалась як висока (табл. 7.1). Старт проведений на початку головної фази магнітної бури. Індекс  $K_p$  збільшувався від 3 (до старту) до 6 – 7 (після нього).

У якості контрольних використовувались вимірювання в інші дні травня цього року.

Для діагностики нижньої іоносфери використовувався метод часткових відбиттів. Вимірювання амплітуд частково відбитого (ЧВ) сигналу звичайної  $A_o$  і незвичайної  $A_x$  поляризацій, а також шумів  $A_{no}$ ,  $A_{nx}$ , виконані на частоті 2.3 МГц. Приклад часових залежностей  $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ ,  $\langle A_{no,nx}^2 \rangle$  і спектральної складової  $\langle A_o^2 \rangle$  з періодом 5.3 хв наведений на рис. 7.1. Із рис. 7.1 а, б видно, що суттєві (до 7 разів) збільшення  $\langle A_{o,x}^2 \rangle$  мають місце близько 08:00 UT і з 09:00 UT до 10:00 UT.

Це ж відноситься і до параметру  $\langle A_{no,nx}^2 \rangle$  (рис. 7.1 в). Спектральний аналіз на інтервалах  $\Delta t_2 = 32$  хв ряду  $\langle A_o^2 \rangle$  показав, що найсильніше (до 2 – 3 разів) збільшувалась гармоніка з періодом близько 5 хв. На рис. 7.1 г наведена часова



залежність амплітуди цієї гармоніки, нормованої на середньоквадратичне відхилення  $\langle A_o^2 \rangle$ , яке розраховувалось на тих же інтервалах часу.

Таблиця 7.1

### Геофізичні умови

Дата	F10.7	W	Рентгенівські спалахи			Оцінки планетарних індексів								
			C	M	X	$A_p$	$K_p$							
12.05.1997	72	12	1	0	0	3	1	0	1	1	1	2	1	1
13.05.1997	74	15	0	0	0	3	0	0	0	0	1	2	2	1
14.05.1997	74	17	0	0	0	6	1	0	0	1	2	3	3	2
15.05.1997	73	15	0	0	0	53	3	3	6	7	7	5	3	2

Для розрахунку профілів  $N(z)$  за методикою диференційного поглинання використовувалась величина

$$R(z) = \frac{\langle A_x^2 \rangle - \langle A_{nx}^2 \rangle}{\langle A_o^2 \rangle - \langle A_{no}^2 \rangle}.$$

Усереднення амплітуд виконувалось на інтервалах 5 і 10 хв.

З іншої сторони, теорія методу ЧВ дає такий зв'язок між профілем  $R(z)$ , який оцінюється зі спостережень, і профілем  $N(z)$ , який ми шукаємо:

$$\ln \left( \frac{R_0(z)}{R(z)} \right) = \int_{z_0}^z K(z') N(z') dz',$$

де  $z_0$  – висота нижньої границі іоносфери;  $K(z')$  – ядро інтегрального рівняння;  $R_0(z)$  – відома з теорії функція.

У якості профілю ефективної частоти зіткнень електронів  $\nu(z)$  використовувався модельний профіль [379]. Оскільки зворотна задача у методі ЧВ є некоректною, застосовувався алгоритм регуляризації [383].

Показано [383], що застосування регуляризуючого алгоритму дозволяє зменшити статистичну похибку відновлення  $N(z)$  по  $R(z)$  у 3 – 5 разів і збільшити діапазон висот, де відновлення можливе, приблизно на 10 км. Встановлено, що

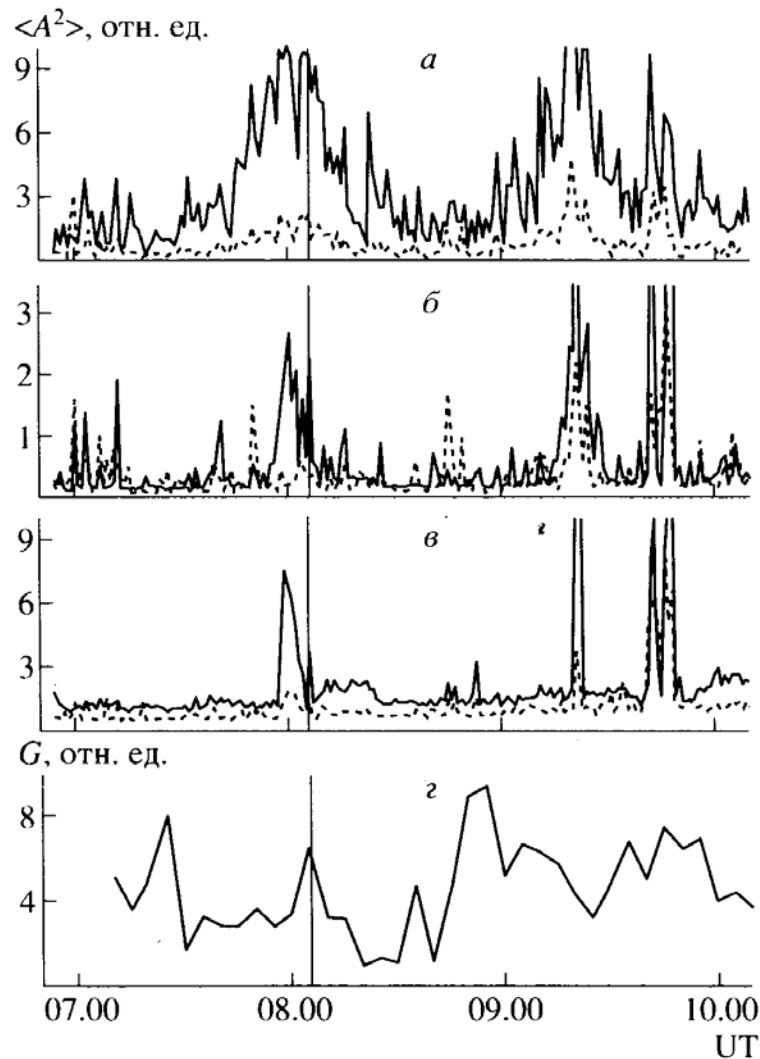


Рис. 7.1 Часові залежності середніх квадратів амплітуд сигналу з різних висот ( $a$  – 84 км;  $b$  – 81 км) і шуму ( $c$ ), а також спектральної складової  $\langle A_0^2 \rangle$  (період  $T \approx 5.3$  хв) сигналу, що приймався з висоти 84 км ( $d$ ). Безперервна лінія – звичайна компонента; пунктирна – незвичайна компонента. Вертикальна лінія у момент часу 08:07 UT тут і на інших рисунках – момент старту ракети. Амплітуда спектральної складової, яка оцінювалась на інтервалі 32 хв, відноситься до середини інтервалу

оптимальний часовий інтервал  $\Delta T$  усереднення при отриманні оцінок  $\langle A_{o,x}^2 \rangle$  складає 5 – 10 хв [383]. За менших  $\Delta T$  суттєво збільшується статистична похибка оцінки  $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ , а при більших  $\Delta T$  неможливо прослідкувати за часовими варіаціями  $N$  через ефект згладжування. Похибка відновлення  $N(z)$  складала 50 % і 30 % при усередненні на інтервалі 5 і 10 хв відповідно. Профіль  $N$  вдалося отримати у діапазоні висот  $z \sim 75 - 85$  км; нижче і вище відношення сигнал/шум  $q_{o,x}$  було неприпустимо низьким (менше 1). Залежність  $N$  від часу для різних висот показана на рис. 7.2 (безперервна лінія).

Старт КА мав місце о 08:07 UT. Видно, що протягом приблизно 1 год до старту і 45 хв після нього  $N$  залишалась практично незмінною. Близько 08:50 UT на висотах  $\sim 75 - 85$  км виникають квазіперіодичні зміни  $N$  з періодом  $T = 30$  хв, амплітудою 30 – 70 % (похибка оцінки  $N$  не перевищувала 30 %) і тривалістю  $\Delta T \approx 2$  год.

Важливо, що час запізнення збурень по відношенню до моменту старту КА на різних висотах складав 45 – 55 хв. Додамо, що у контрольний день такі хвильові збурення були відсутні (пунктирні лінії на рис. 7.2).

У D-області іоносфери  $\Delta N/N_0 \approx 30 - 70$  % для  $z \sim 75 - 85$  км відповідно. Важко уявити, що таку амплітуду мали хвилі, що поширювались безпосередньо від області старту ракети (їхня удавана швидкість складала б тоді близько 3 км/с), або з області високих широт. Скоріш за все, хвильові збурення викликані квазіперіодичними висипаннями частинок із магнітосфери. У роботі [278] оцінені їх параметри. Результати оцінок параметрів потоків частинок, що висипаються, наведені у табл. 7.2. Із табл. 7.2 видно, що для забезпечення необхідних варіацій  $N$  у D-області потрібні густини потоків частинок  $p \sim 10^6 - 4 \cdot 10^7$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> із енергіями  $\varepsilon \sim 10^2 - 10$  кеВ відповідно. Такі густини потоків не представляються завеликими навіть для середньоширотних висипань (у високих широтах  $p \sim 10^{10} - 10^{13}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> [384]).

Залишається відповісти на питання: чим викликані потоки частинок? Магнітною бурєю, або стартом КА? Швидше за все, на потужний вплив магнітної бурі наклалися ефекти, пов'язані зі стартом ракети.

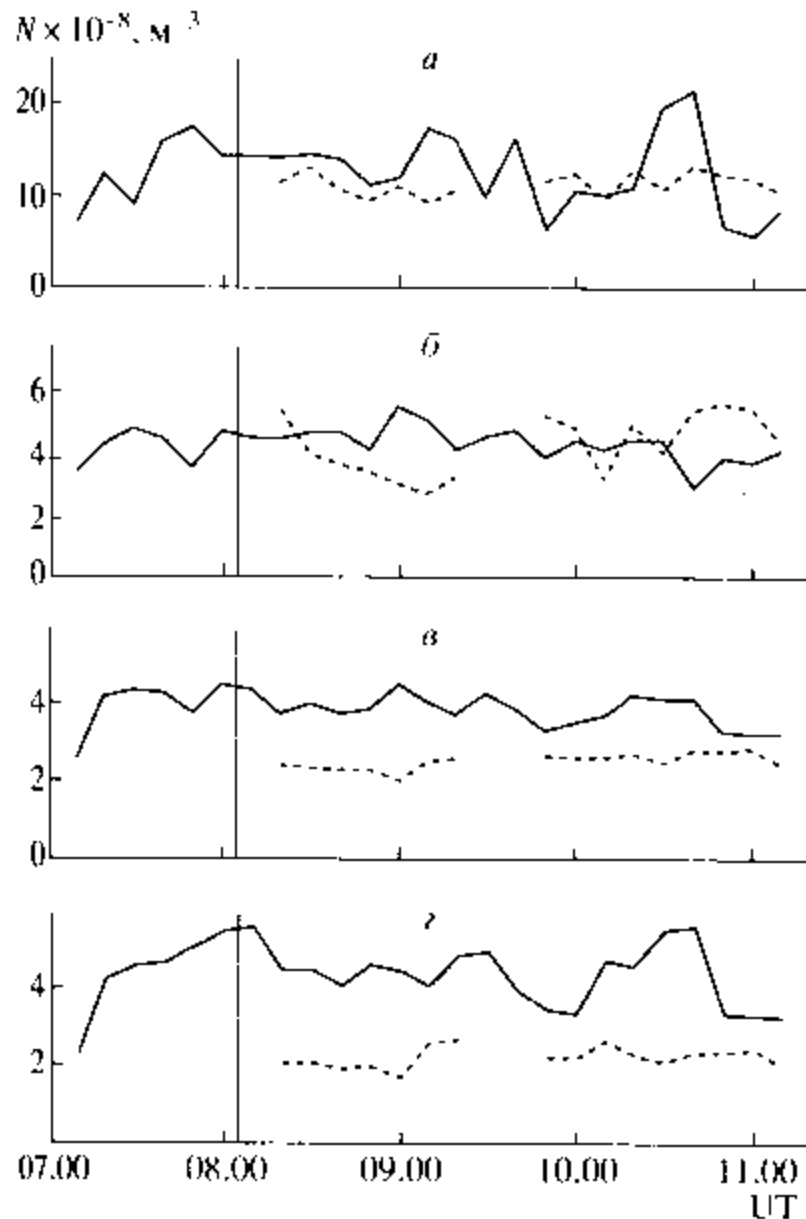


Рис. 7.2 Часова залежність концентрації електронів (суцільна лінія – 15.05.1997; пунктирна – 24.05.1997) на різних висотах: *a* – 84 км; *б* – 81 км; *в* – 78 км; *г* – 75 км

### 7.3 Фізичні процеси в середній іоносфері, які супроводжували старти ракет

### 7.3.1 Старт ракет з космодрому Байконур

Для дослідження ефектів стартів ракет в середній іоносфері використовувався доплерівський радар вертикального зондування.

Таблиця 7.2

**Параметри іоносфери та частинок, що висипаються ( $\alpha$  – коефіцієнт квадратичної рекомбінації електронів,  $N_0$  – початкове значення концентрації електронів)**

$z$ , км	$\alpha$ , $\text{м}^3\text{с}^{-1}$	$N_0$ , $\text{м}^{-3}$	$\Delta N$ , $\text{м}^{-3}$	$q_{io}$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Delta q_i$ , $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$	$\Pi$ , $\text{Дж м}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\varepsilon$ , кеВ	$p$ , $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
75	$10^{-11}$	$3 \cdot 10^8$	$10^8$	$9 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$10^2$	$1.4 \cdot 10^6$
84	$10^{-12}$	$10^9$	$7 \cdot 10^8$	$10^6$	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-8}$	10	$4 \cdot 10^7$

Розглянемо варіації доплерівських спектрів, що мають місце при стартах і польотах ракет на віддаленнях до 2200 км (Байконур – Харків). Приклад результатів денних спостережень показаний на рис. 7.3. Старт ракети «Союз» мав місце о 13:22 UT 18 жовтня 1999 р. До старту ракети іоносфера залишалася спокійною. Доплерівські спектри були одномодовими з чітко вираженим максимумом. Приблизно з 12:55 UT до 13:03 UT спостерігалися основна та додаткова моди відбитого сигналу, виник квазіперіодичний процес із періодом  $T \approx 10$  хв. Після 13:45 UT амплітуда коливань значно збільшилась (амплітуда доплерівського зміщення частоти досягала  $f_{da} = 0.5$  Гц), почало переважати коливання з  $T \approx 20$  хв. Це тривало близько 30 хв. З 14:12 UT до 14:40 UT іоносфера залишалася практично незбуреною. В інтервалі часу 14:40 – 14:50 UT, крім основної моди сигналу, реєструвалася додаткова мода, зміщена за частотою на  $f_d = -0.3$  Гц ( $f_d$  – доплерівська частота). Після 14:50 UT спостерігалася

зникнення стійкого максимуму у доплерівських спектрах. Це свідчить про появу (або скоріше про підсилення інтенсивності) випадкових неоднорідностей в іоносфері нижче області відбиття радіохвилі (близько 150 км). Такого роду збуреність тривала понад 1 год. Додамо, що захід Сонця на рівні Землі в пункті спостереження мав місце близько 15:20 UT, а в області відбиття – приблизно на 1 год пізніше.

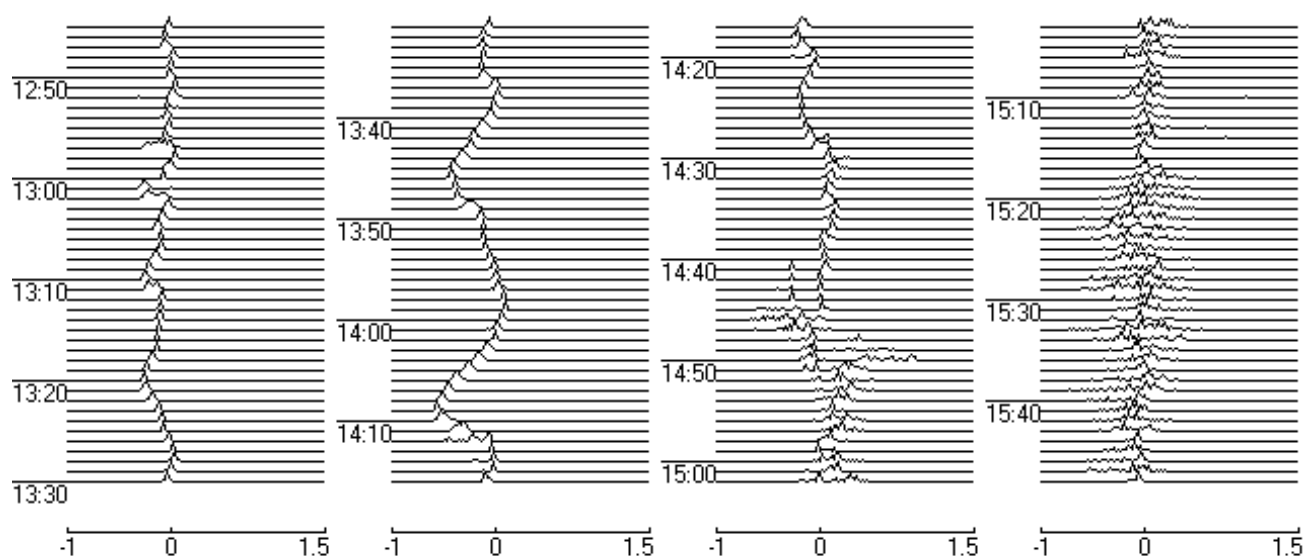


Рис. 7.3 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при старті КА «Союз» 18 жовтня 1999 р. На цьому й інших рисунках по горизонтальній осі вказано доплерівське зміщення частоти радіосигналу у Гц, а по вертикальній осі – всесвітній час UT

Приклад варіацій доплерівських спектрів при старті важкої ракети «Протон» показаний на рис. 7.4. Її старт відбувся 5 липня 1999 р. о 13:22 UT. Цей запуск примітний тим, що на 277 с на висоті близько 110 км вибухнув бак двигуна другого ступеня. Далі падаючі залишки ракети на 410 с польоту на висоті близько 25 км вибухнули.

Захід Сонця на Землі в цей день мав місце близько 19:10 UT. До старту ракети іоносфера залишалася незбуреною. Лише о 12:54 – 12:58 UT та 13:08 –

13:12 UT відмічалися короточасні ефекти «розсипання» спектрів. З 13:15 UT і до 14:50 UT будь-які збурення в іоносфері були відсутні. Приблизно з 14:54 UT до 14:58 UT спостерігалася додаткова мода, зміщена на  $-0.2$  Гц. Слабко виражена мода також зафіксована в інтервалах часу 15:03 – 15:05 UT та 15:08 – 15:09 UT. Після цього іоносфера протягом тривалого часу знову залишалася спокійною.

Приклад результатів нічного спостереження процесів в іоносфері, які супроводжували старт ракети середньої ваги, показаний на рис. 7.5. Запуск ракети «Зеніт – 2» мав місце 9 вересня 1998 р. о 20:29 UT. Слід зауважити, що іоносфера протягом цієї ночі була збуреною (були присутні інтенсивні випадкові дрібномасштабні неоднорідності) як до старту ракети, так і після нього. При цьому в доплерівських спектрах зникає максимум, спектри розширюються (кажуть,

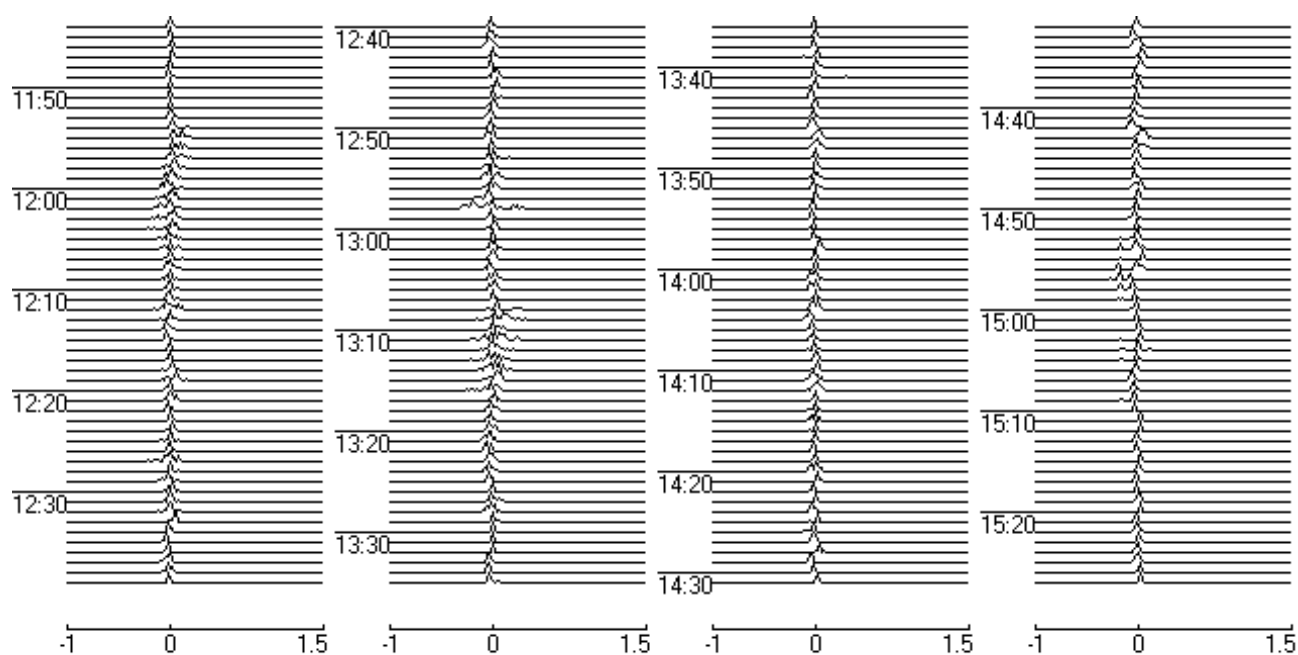


Рис. 7.4 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Протон» 5 липня 1999 р.

що спектр «розсипався» (див., наприклад, [384])). Сам запуск ракети примітний тим, що на 272 с польоту сталося відключення бортових комп'ютерів, і ракета

стала падати з висоти близько 160 км. Через сильну збуреність іоносфери пошук ефектів, пов'язаних з польотом ракети, ускладнений. Проте, можна стверджувати, що до 20:10 UT середня частота ДС  $f_d \approx 0$ , ширина спектру – 0.1 – 0.5 Гц, з 20:10 UT до 20:30 UT доплерівський спектр “розсипався”, з 20:30 UT до 20:45 UT він був також дифузним, хоча ширина спектру зменшилась від 0.7 Гц до 0.3 Гц. Проглядається слабкий квазіперіодичний процес із  $T \approx 10$  хв і більш сильний із  $T \approx 20$  хв. Істотне розширення спектра (до 0.8 Гц) спостерігалось в інтервалі часу 21:29 – 21:37 UT. Після 21:40 UT ширина спектру становила 0.3 – 0.5 Гц.

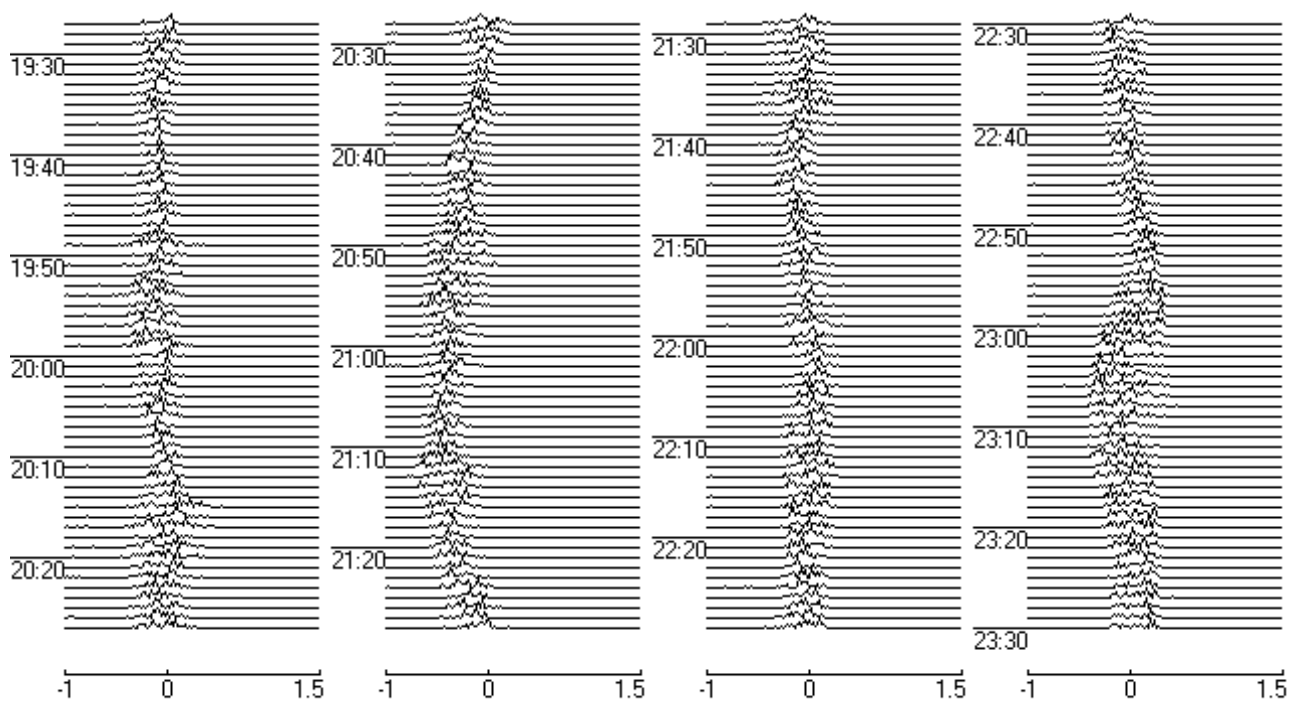


Рис. 7.5 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Зеніт-2» 9 вересня 1998 р.

Приклад результатів нічних спостережень ефектів, які супроводжували запуск важкої ракети «Протон» 21 березня 1999 р. показаний на рис. 7.6. Старт відбувся о 00:09 UT. До нього іоносфера залишалася в основному спокійною. Після 23:13 UT виник квазіперіодичний процес із  $f_{da} \approx 0.2$  Гц,  $T \approx 18$  хв, тривалістю  $\Delta T \approx 40$  хв. З 01:12 UT до 01:18 UT спостерігалася додаткова мода



сигналу, зміщена на 0.2 Гц, з 01:28 UT до 02:15 UT – ефект «розсіпання» спектрів. Слід додати, що схід Сонця на рівні Землі мав місце приблизно о 02:30 UT, за годину до цього – в нижній частині F-області іоносфери. Після 02:15 UT сигнал залишався практично одномодовим, спостерігалися квазіперіодичні процеси спочатку з  $T \approx 30$  хв і  $f_{da} \approx 0.25$  Гц, а потім із  $T \approx 7 - 8$  хв і  $f_{da} \approx 0.15$  Гц.

При старті надважкої ракети «Енергія» 15 травня 1987 р. о 17:30 UT квазіперіодичні коливання ( $T \approx 10 - 15$  хв) виникли через 66 хв і продовжувалися близько 1 год ( $f = 4.6$  МГц) [341]. Приблизно така ж картина спостерігалась і під час старту такої ж ракети 15 листопада 1987 р.

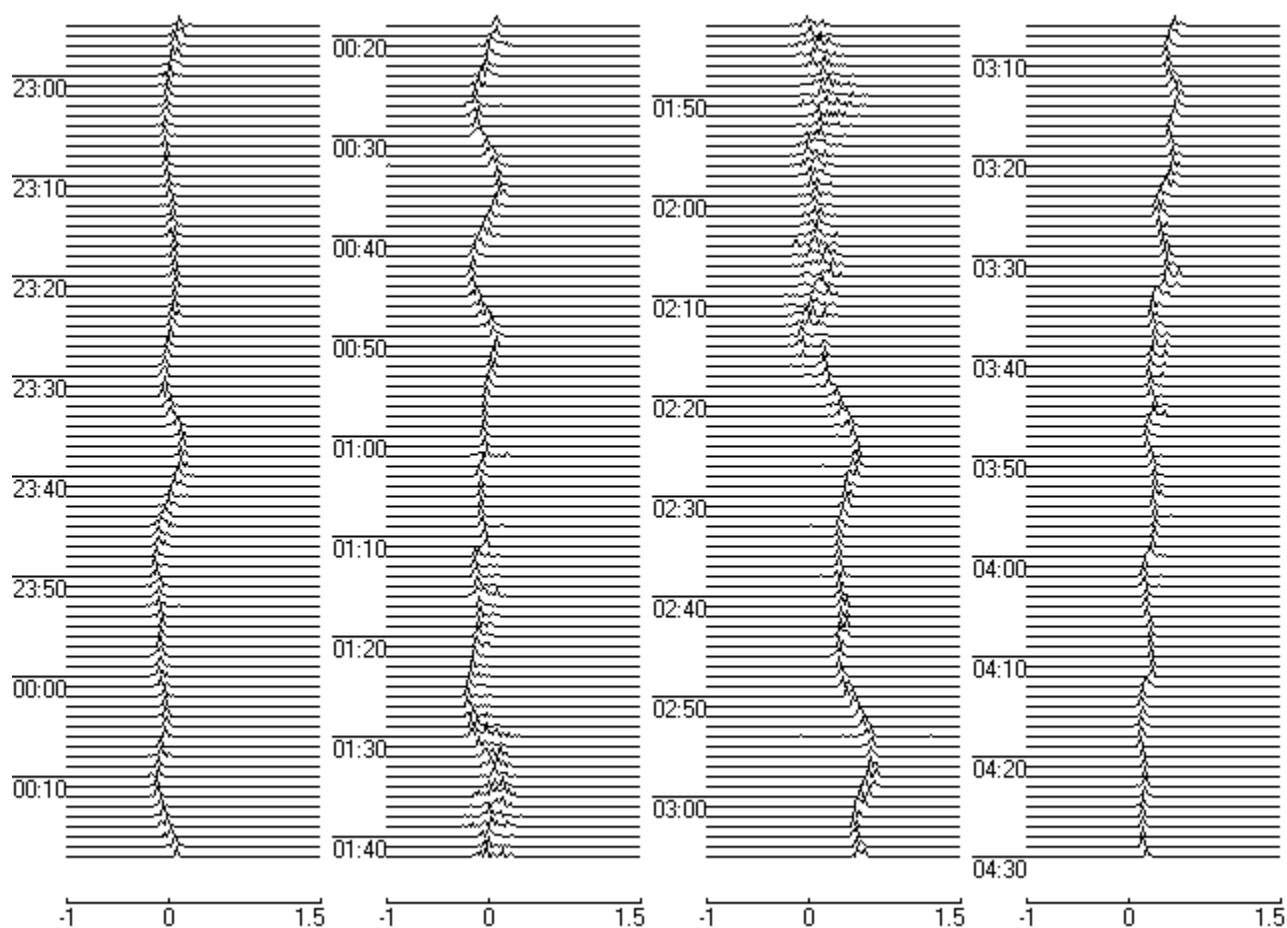


Рис. 7.6 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Протон» 20 – 21 березня 1999 р.

### 7.3.2 Старт ракет з космодрому Плесецьк

Опишемо коротко ефекти в іоносфері, які супроводжували старт ракети з космодрому Плесецьк. Відстань Плесецьк – Харків  $R \approx 1500$  км. Так, увечері 9 вересня 1999 р. іоносфера залишалася досить спокійною. В інтервалі часу 17:00 – 17:50 UT спостерігалися слабкі збурення, викликані проходженням вечірнього термінатора. Ракета «Союз» стартувала о 18:00 UT. Приблизно з 18:08 UT і до 18:45 UT мало місце істотне розширення ДС (до 0.5 Гц), а з 18:55 UT до 19:17 UT – зменшення  $f_d$  на 0.3 Гц. В інтервалі часу 19:00–20:50 UT фіксувалося розширення ДС приблизно на 0.2 Гц. Після цього іоносфера була відносно спокійною.

### 7.3.3 Старт ракет із космодромів США та Франції

Далі розглянемо глобальні збурення при польоті ракет і маневрах космічних апаратів. Для дослідження можливих глобальних ефектів в іоносфері виявилися зручними запуски ракет з космодромів США і Франції (точніше Європейського космічного агентства).

Приклад часових варіацій доплерівських спектрів у денний час показаний на рис. 7.7 Старт космічного апарату “Space Shuttle Endeavour” відбувся 4 грудня 1998 р. о 08:35 UT. У цей день іоносфера була сильно збуреною, протягом всього часу спостереження мав місце ефект «розсіпання» спектра сигналу. До старту ракети і незабаром після нього спостерігався також квазіперіодичний процес з  $T \approx 10$  хв і  $f_{da} \approx 0.1$  Гц. З 08:50 UT до 09:25 UT іоносфера залишалася порівняно спокійною, а з 09:25 UT до 10:00 UT фіксувалися значні розширення доплерівських спектрів, а також квазіперіодичний процес з  $T \approx 15 - 20$  хв. О 10:05 – 10:10 UT виникла додаткова мода з максимальним зміщенням по частоті 0.5 Гц.

Після 10:22 UT протягом тривалого часу мав місце ефект «розсипання» спектра сигналу, а також квазіперіодичний процес з амплітудою до 0.2 Гц і  $T \approx 10$  хв.

Приклад варіацій доплерівських спектрів, які супроводжували старт космічного апарату «Space Shuttle Discovery» 29 жовтня 1998 р. о 19:19 UT (перехідний час доби), показаний на рис. 7.8. Захід Сонця на рівні Землі мав місце близько 15:00 UT, у нижній частині F-області іоносфери – близько 16:00 UT. Швидше за все ефекти, пов'язані з термінатором, закінчилися до 18:50 UT. За 30 хв до старту ракети в іоносфері спостерігався слабо виражений квазіперіодичний процес із  $T \approx 7$  хв і  $f_{da} \approx 0.10 - 0.15$  Гц. До того ж із 19:13 UT до 19:45 UT сигнал був переважно двомодовим.

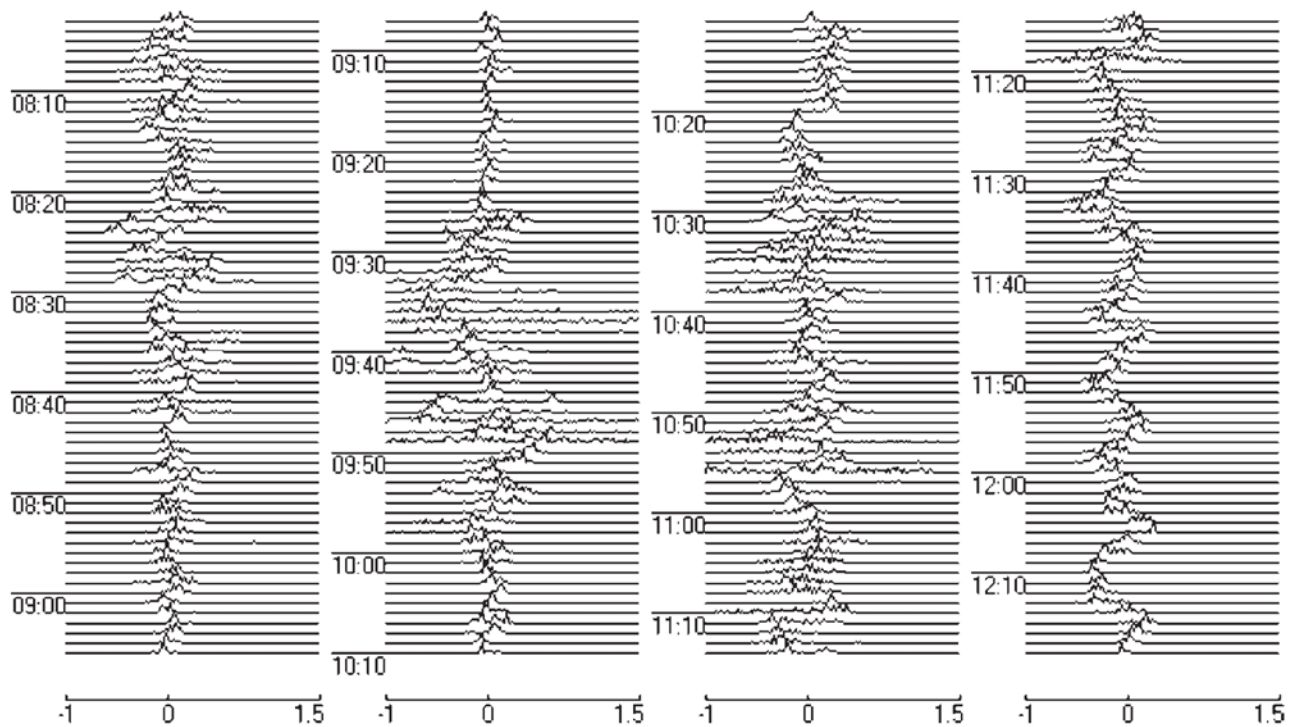


Рис. 7.7 Варіації ДС на частоті 2.8 МГц при старті КА “Space Shuttle Endeavour” 4 грудня 1998 р.

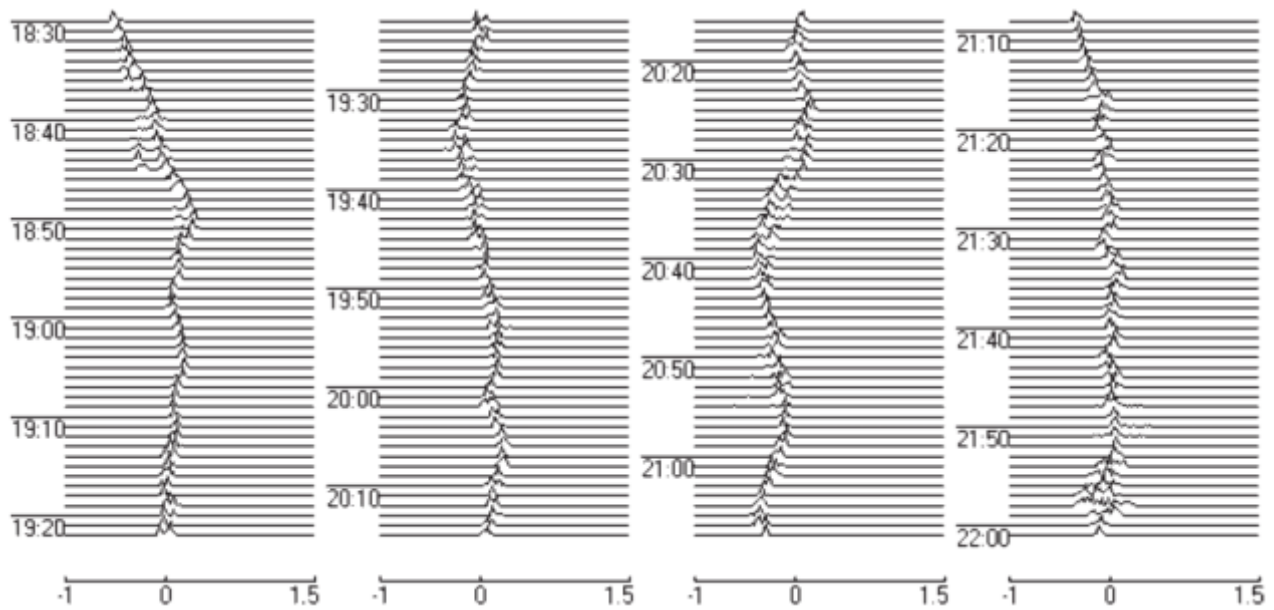


Рис. 7.8 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Space Shuttle Discovery» 29 жовтня 1998 р.

Іоносфера залишалася слабо збуреною приблизно до 20:30 UT. Після цього часу сигнал став двомодовим ( $\Delta T \approx 15$  хв); виник також квазіперіодичний процес із  $T \approx 30$  хв тривалістю 50 хв. З 21:10 UT до 21:55 UT доплерівський спектр залишався практично незмінним. У інтервалі 21:55–22:00 UT спостерігалось його короткочасне «розсіпання».

Старт ракети середньої ваги типу «Delta» мав місце 7 лютого 1999 р. о 21:04 UT (рис. 7.9). Приблизно о 21:10 UT виникає додаткова мода з  $f_d \approx -0.2$  Гц і квазіперіодичний процес із  $T \approx 8 - 10$  хв,  $f_{da} \approx 0.1$  Гц і  $\Delta T \approx 40$  хв. Після 21:50 UT іоносфера залишалась спокійною, а в інтервалі часу 22:05–22:25 UT відмічалось різке зменшення  $f_{da}$  на 0.4 – 0.6 Гц, «розсіпання» спектрів. Після 22:25 UT іоносфера також була достатньо спокійною; виявлявся слабо виражений квазіперіодичний процес із  $T \approx 25$  хв і  $f_{da} \approx 0.10 - 0.15$  Гц.

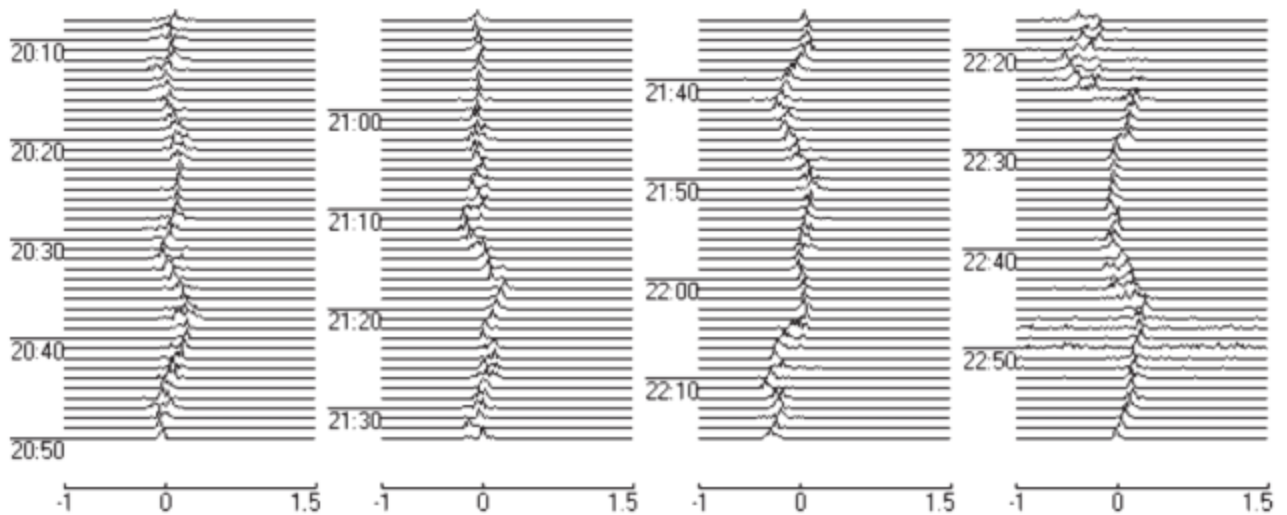


Рис. 7.9 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Delta» 7 лютого 1999 р.

Наступний приклад відноситься до спостережень у нічний і ранковий час (рис. 7.10). Старт ракети типу «Atlas» мав місце 16 лютого 1999 р. о 01:45 UT. До 00:30 UT іоносфера залишалася слабо збуреною. В інтервалі часу 00:35 – 01:05 UT зафіксований квазіперіодичний процес із  $T \approx 20 - 25$  хв,  $f_{da} \approx 0.2$  Гц. Безпосередньо перед стартом період зменшився до 10 хв ( $\Delta T \approx 20$  хв). У 01:55–02:05 UT спостерігалася двомодовість сигналу, а після 02:32 UT – сильний квазіперіодичний процес із  $f_{da} \approx 0.3 - 0.4$  Гц, змінним періодом (від 12 до 24 хв) і тривалістю 2.5 год. Додамо, що схід Сонця на рівні Землі мав місце близько 04:00 UT, а у нижній частині F-області іоносфери – близько 03:00 UT.

Цей приклад також відноситься до спостереження ефектів, в основному, у ранковий час. Старт ракети «Titan – II» мав місце 20 червня 1999 р. о 02:15 UT. Схід Сонця на рівні Землі стався близько 23:50 UT, а в нижній частині області F іоносфери – на 1 год раніше. Швидше за все, перехідні процеси закінчилися до 02:00 UT. Безпосередньо перед стартом ракети іоносфера залишалася слабо збуреною, спостерігалася розширення доплерівських спектрів до 0.15 – 0.20 Гц. Після 02:20 UT мало місце збільшення  $f_d$  на 0.2 – 0.3 Гц, яке тривало близько 30 хв. У 02:52 UT з'явився квазіперіодичний процес ( $T \approx 6 - 7$  хв,  $\Delta T \approx 20$  хв,

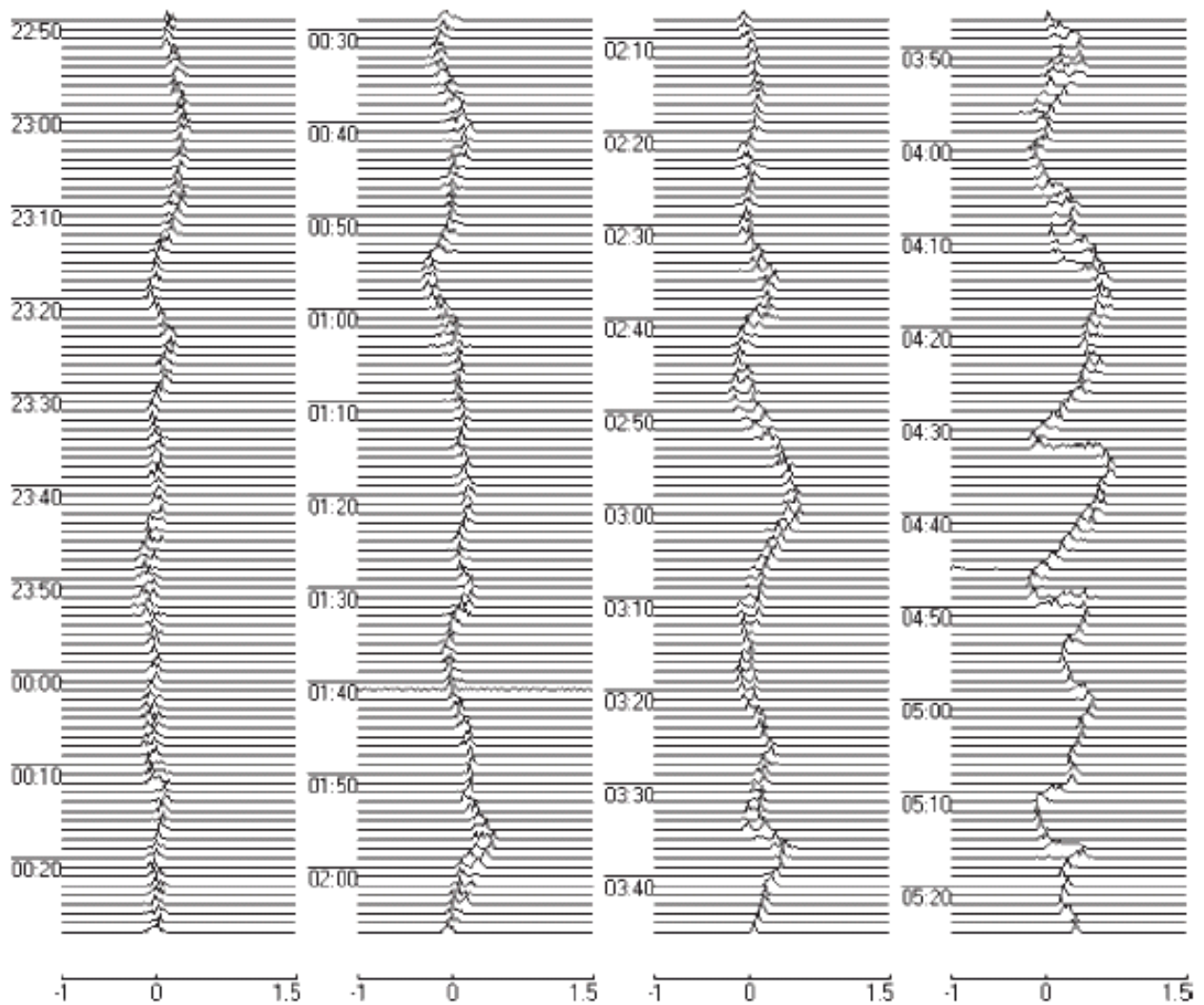


Рис. 7.10 Варіації ДС на частоті 3.0 МГц при старті КА «Atlas» 16 лютого 1999 р.

$f_{da} \approx 0.1 - 0.2$  Гц). В інтервалі часу 03:45 – 04:05 UT спостерігався слабо виражений ефект «розсіпання» спектра сигналу. Після цього часу іоносфера залишалася спокійною.

Наступний приклад відноситься також до ранкового часу спостереження. Старт космічного апарату «Space Shuttle Columbia» мав місце 23 липня 1999 р. о 04:28 UT. Схід Сонця на рівні Землі спостерігався близько 00:20 UT, а у нижній частині F-області іоносфери – приблизно на 1 год раніше. До 01:00 – 02:00 UT перехідні процеси, пов'язані з термінатором, закінчилися. Іоносфера цього ранку була, в основному, спокійною. Лише з 03:30 до 03:48 UT відзначалося поступове зменшення доплерівської частоти до  $-0.8$  Гц, яке швидко (через 1 – 2 хв)

закінчилося. Перед стартом протягом 30 хв спостерігався слабо виражений квазіперіодичний процес із  $T \approx 8$  хв,  $f_{da} \approx 0.1 - 0.2$  Гц. О 04:40 UT зафіксовано короточасний ефект «розсипання» спектру, який повторився в інтервалах часу 05:29 – 05:35 UT і 05:55 – 06:05 UT. У інші проміжки часу іоносфера залишалась спокійною.

Ще один приклад відноситься до запуску у нічний час надлегкої ракети типу «Pegasus», який мав місце 23 жовтня 1998 р. о 00:02 UT. Приблизно за 1 год до старту ракети іоносфера була слабо збуреною, спостерігався слабкий квазіперіодичний процес, розширення доплерівських спектрів зазвичай не перевищувало 0.2 – 0.3 Гц. В інтервалі часу 00:14 – 00:24 UT воно досягло 0.5 Гц, таке ж повторилося з 00:40 UT до 1:40 UT. Особливо значне розширення (0.6 – 0.7 Гц) доплерівських спектрів мало місце з 01:10 UT до 01:25 UT, а зменшення  $f_d$  досягало 0.5 Гц. Далі доплерівський спектр залишався, в основному, одномодовим, величина  $f_d \approx 0.3$  Гц. Схід Сонця у нижній частині F-області іоносфери почався приблизно о 02:25 UT, після чого помічені значні варіації доплерівських спектрів, які продовжувались не менше, ніж 1.5 год.

Перелічені вище ракети стартували з космодромів США.

Опишемо коротко варіації в іоносфері у ніч з 21 на 22 березня 2000 р. Старт ракети «Ariane» з космодрому Куру мав місце о 23:28 UT (рис. 7.11). З 22:00 UT до 23:00 UT спектр сигналу був переважно багатомодовим, в інтервалі часу 23:10 – 00:20 UT – в основному одномодовим. Лише з 23:32 UT до 23:40 UT спостерігалось його розширення. Після 00:25 UT протягом приблизно 40 хв спостерігається добре виражений квазіперіодичний процес зі змінним періодом і амплітудою близько 0.4 Гц. Наступні 20 хв іоносфера залишалася спокійною, а після 01:40 UT почали проявлятися ефекти ранкового термінатора.

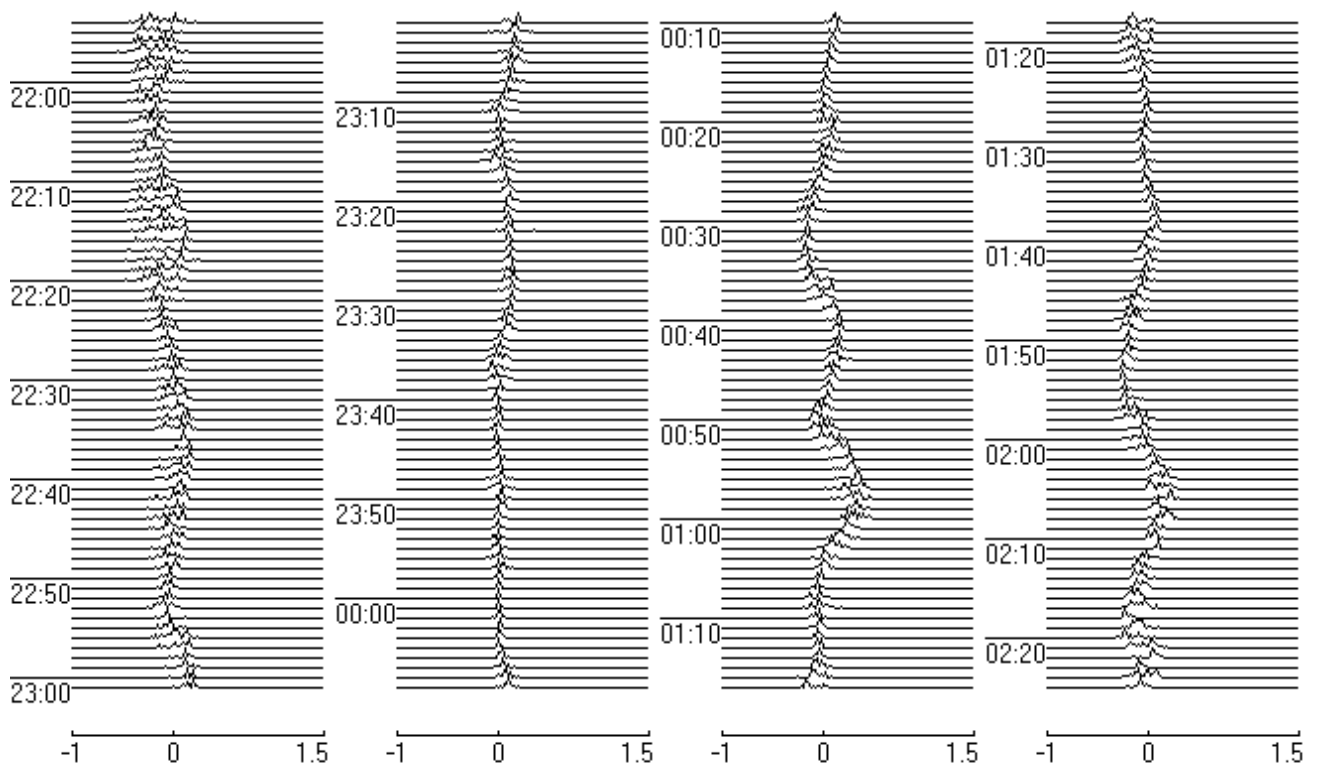


Рис. 7.11 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при старті КА «Ariane» 21 – 22 березня 2000 р.

### 7.3.4 Глобальні збурення при посадці космічних апаратів

При посадці космічного апарату йому завчасно надається гальмівний імпульс. Наприклад, для апаратів «Space Shuttle» цей час становить  $10 - 10^2$  с, а імпульс –  $10^7 - 10^8$  Н·с, потужність реактивного струменя –  $10^8 - 10^9$  Вт, а його енергія –  $10^9 - 10^{10}$  Дж. З огляду на те що гальмівний імпульс надається двигунами, розташованими безпосередньо у плазмі, їхньої енергетики достатньо для генерації в іоносфері великомасштабних і навіть глобальних збурень.

Для прикладу, на рис. 7.12 показані варіації доплерівських спектрів, що супроводжували вмикання двигунів при гальмуванні КА «Space Shuttle Discovery», яке мало місце 12 червня 1998 р. о 18:00 UT. В інтервалі часу 15:50 – 16:45 UT іоносфера була середньо збуреною, спостерігалася багатопроменевість і квазіперіодичний процес із  $T \approx 8 - 10$  хв і  $f_{da} \approx 0.1 - 0.2$  Гц. З 16:47 UT до 17:00 UT



зафіксовано «розсіпання» спектрів сигналу, яке в меншій мірі повторювалося в інтервалах часу 17:07 – 17:18 UT та 17:37 – 17:56 UT. Приблизно з 18:10 UT протягом 25 хв іоносфера залишалася слабо збуреною; з 18:35 UT до 19:30 UT знову спостерігався ефект «розсіпання» спектрів, після 19:30 UT відзначалось деяке ослаблення зазначеного ефекту. Додамо, що захід Сонця на рівні Землі мав місце о 19:11 UT, а на рівні відбиття радіохвилі – приблизно на 1 год пізніше.

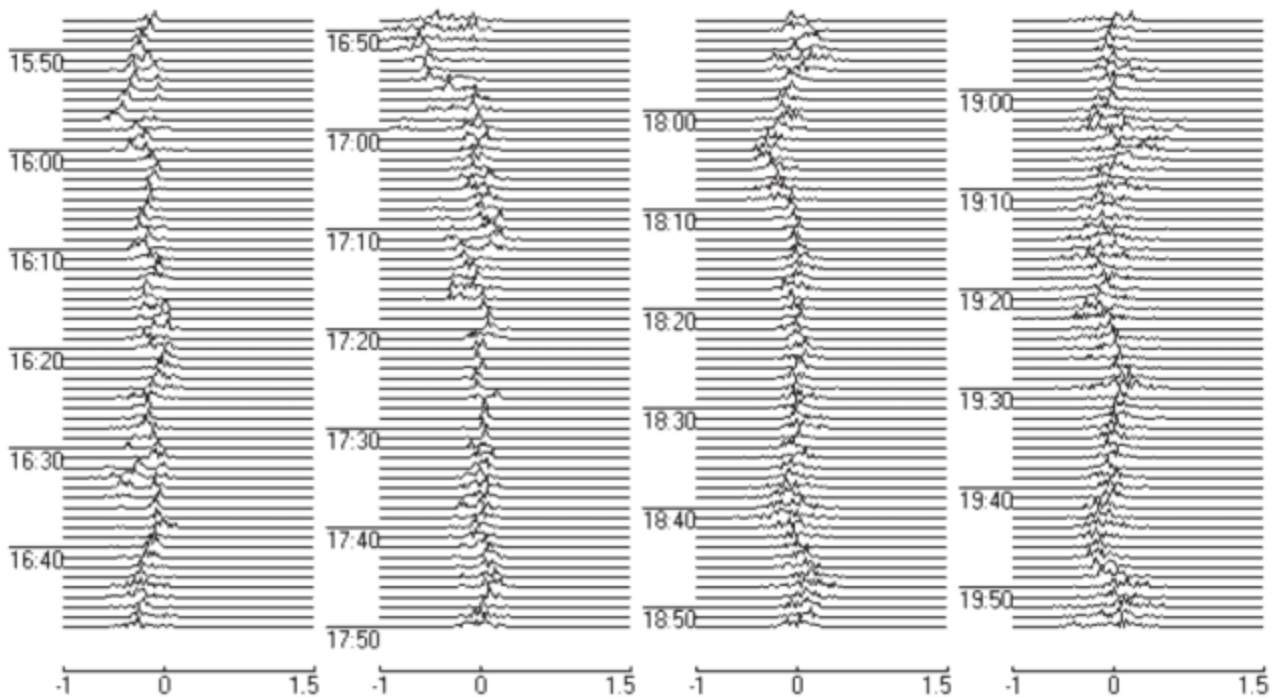


Рис. 7.12 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при посадці КА “Space Shuttle Discovery” 12 червня 1998 р.

На рис. 7.13 показані варіації доплерівських спектрів, що супроводжували посадку КА того ж типу, яка сталася 7 листопада 1998 р. о 17:04 UT. В інтервалі часу 14:35 – 15:24 UT в іоносфері спостерігався квазіперіодичний процес із  $T \approx 10$  хв і  $f_{da} \approx 0.2 - 0.4$  Гц, сигнал залишався одномодовим або двомодовим з невеликим відхиленням другої моди по частоті. З 15:24 UT по 16:05 UT виникло різке зменшення  $f_d$  на 0.5 – 0.6 Гц, а з 15:46 UT до 15:50 UT – навіть на 1 Гц. Наступне значне падіння  $f_d$  зафіксовано в інтервалі часу 16:22 – 16:55 UT,

причому з 16:42 UT до 16:55 UT сигнал був двомодовим із різницею доплерівських частот до 1 Гц. Після 17:00 UT іоносфера протягом 1 год залишалася слабо збуреною. В інтервалі часу 18:00 – 18:50 UT знову спостерігаються помітні варіації  $f_d$ , які не перевищують 0.5 Гц, і двомодовість сигналу. Слід зазначити, що захід Сонця на рівні Землі мав місце приблизно о 14:30 UT, а у нижній частині F-області іоносфери майже на 1 год пізніше. Розглянемо далі варіації доплерівських спектрів у нічний час, що супроводжують посадку КА «Space Shuttle Discovery», яка сталася 28 грудня 1999 р. о 00:01 UT (рис. 7.14). Захід Сонця на рівні Землі спостерігався близько 14:00 UT,

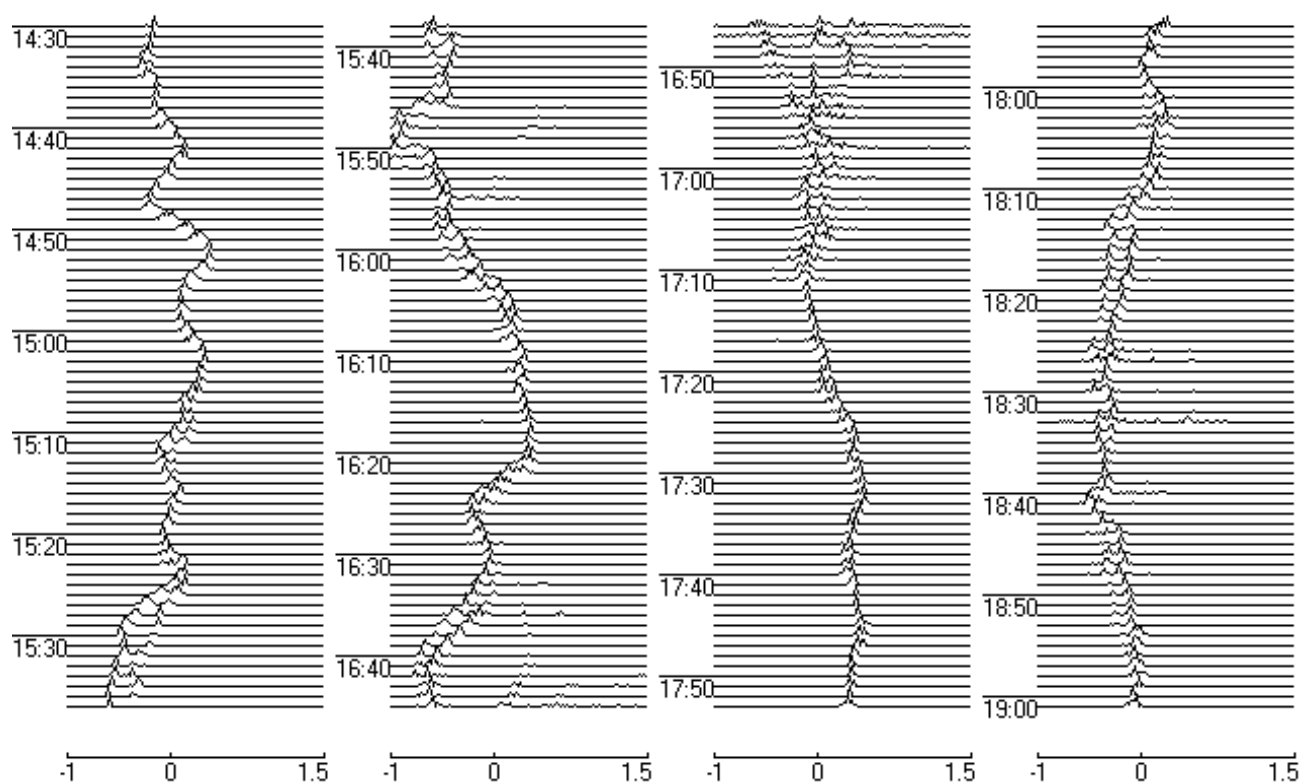


Рис. 7.13 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при посадці КА «Space Shuttle Discovery» 7 листопада 1998 р.

так що до 18:00 – 19:00 UT перехідні процеси, викликані вечірнім термінатором, закінчилися. Протягом всієї ночі доплерівський спектр мав ширину 0.2 – 0.3 Гц. З 21:40 UT до 22:30 UT доплерівське зміщення частоти було незначним

( $\leq 0.1 - 0.2$  Гц). О 22:35 UT виникає квазіперіодичний процес, який тривав близько 1 год,  $f_{da} \approx 0.2$  Гц,  $T \approx 12 - 15$  хв. Цікаво, що з 22:55 UT до 23:40 UT постійна складова у довгоперіодному спектрі зменшувалася приблизно на 0.3 Гц, у складі спектру з'явилися невластиві F-області іоносфери гармоніки з періодом 2, 4 і 8 хв. В інтервалах часу 23:40 – 00:10 UT та 00:45 – 01:30 UT величина  $f_d$  залишалася практично незмінною. З 00:10 UT до 00:45 UT і після 01:30 UT знову спостерігалися квазіперіодичні процеси із амплітудою  $f_{da} \approx 0.2$  Гц і  $T \approx 20$  та 12 хв відповідно.

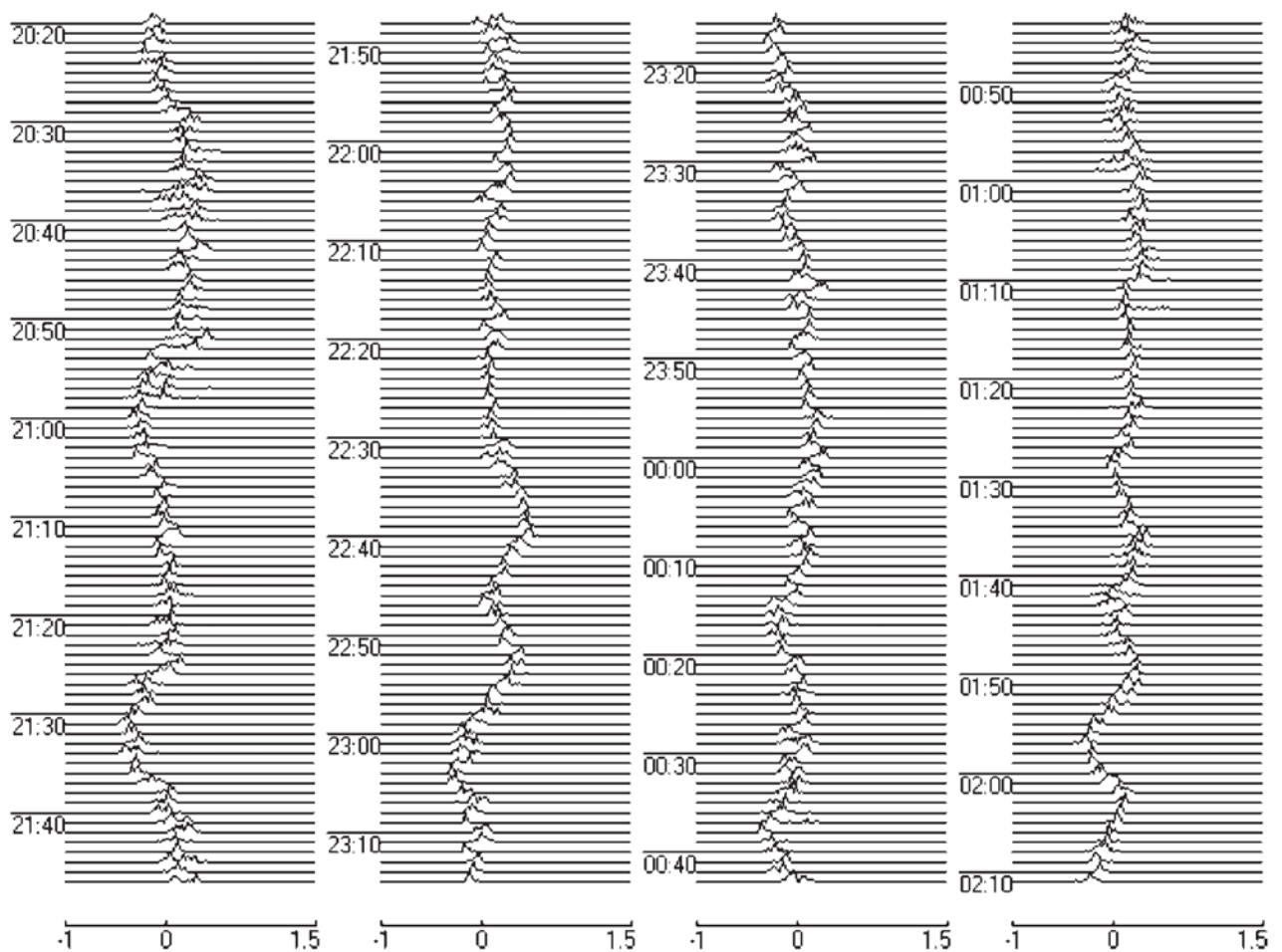


Рис. 7.14 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при посадці КА «Space Shuttle Discovery» 27 – 28 грудня 1998 р.

### 7.3.5 Аналіз результатів

*Великомасштабні збурення.* Звернемося знову до рис. 7.3–7.6. Загальним для них є те, що з запізненням близько 60 – 80 хв (для ночі і дня відповідно) у спектрах спостерігається поява додаткової моди, зміщеної на 0.2 – 0.3 Гц у сторону менших доплерівських частот, або «розсіпання» доплерівських спектрів. Тривалість цих ефектів становить 5 – 10 хв. Знаючи відстань між космодроном і пунктом спостереження  $R \approx 2200$  км і  $\Delta t \approx 60 - 80$  хв, можна оцінити удавану швидкість поширення збурень. Вона приблизно дорівнює 490 – 730 м/с. Швидкість такого порядку мають акустичні хвилі. Потужність звуку від ракетних двигунів  $(1 - 3) \cdot 10^7$  Вт. Акустична енергія, поширюючись від місця старту ракети спочатку у вигляді ударної, а потім звичайної акустичної хвилі, досягає висоти  $z \approx 150$  км за час  $\delta t \approx 6 - 7$  хв. Ракета досягла цих висот дещо раніше –  $\delta t_1 \approx 4$  хв. Важливо, що в іоносфері швидкість ракети значно перевищує швидкість звуку. Тому КА є джерелом ударних хвиль. В атмосфері збуджуються та поширюються АГХ. Акустичні хвилі мають швидкість

$$v = \sqrt{\frac{\gamma k T}{M}},$$

де  $\gamma = 1.4$  – показник адіабати,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура газу,  $M$  – середня молекулярна маса.

Час поширення звукових хвиль в іоносфері по горизонталі в денний час дорівнює  $\Delta t' = \Delta t - \delta t_1 \approx 76$  хв (тут  $\delta t_1 \approx 4$  хв). Ракета, рухаючись переважно на схід, при цьому віддалена від місця спостереження на  $R \approx 2300$  км. Тоді скоректоване значення швидкості  $v' = R/\Delta t' = 500$  м/с. При  $M \approx 4.6 \cdot 10^{-26}$  кг температура  $T \approx 575$  К, що відповідає температурі газу в атмосфері на висоті  $z \approx 140$  км. Така висота близька до висоти відбиття хвилі у денний час.

При старті ракети «Енергія»  $\Delta t' \approx 62$  хв,  $v' \approx 620$  м/с, а  $T \approx 880$  К. Така температура має місце на висоті  $z \approx 175$  км (приблизно дорівнює висоті відбиття радіохвилі з 4.6 МГц). Важливо, що зі зростанням  $f$  зростає також висота відбиття хвилі та значення  $v'$  і  $T$ .

При стартах у нічний час  $\Delta t \approx 57 - 58$  хв,  $v' \approx 700$  м/с, а  $T \approx 1000$  К. Така температура спостерігається на висоті, де відбувається відбиття зондуєчої хвилі ( $z \approx 250$  км).

При старті ракети з космодрому Плесецьк картина схожа. Збурення акустичного типу у денний час має запізнення близько  $\Delta t \approx 55$  хв, скоректоване значення  $\Delta t' \approx 51$  хв. При  $R' \approx 1500$  км маємо  $v' \approx 500$  м/с, тобто практично таку ж швидкість, що і для стартів на космодромі Байконур. У нічний час  $\Delta t' \approx 36$  хв,  $v' \approx 700$  м/с, а  $T \approx 1000$  К.

Акустична хвиля виступає переднім фронтом, за нею приходить сильно диспергуюча АГХ, яка має швидкість у кілька сотень м/с. У результаті цього в іоносфері виникають неоднорідності різних масштабів, що призводять до спостережуваного ефекту «розсіпання» спектрів сигналу. Цей процес триває від десятків хвилин до 1 – 2 год (див. рис. 7.3, 7.6).

Що стосується більш швидких збурень, які супроводжують старти ракет, то за допомогою даного методу вони спостерігаються нерегулярно. Незабаром після старту ракети ( $\Delta t \approx 2 - 4$  хв) квазіперіодичні процеси в іоносфері виникли в експериментах 21 березня і 18 жовтня 1999 р. (див. рис. 7.3, рис. 7.7). Цьому запізненню відповідає швидкість  $v \approx 10 - 20$  км/с. У принципі таку швидкість мають гіротропні хвилі, які поширюються у магнітоактивній плазмі Е- і F-областей [65].

21 березня і 5 липня 1999 р. стартували ракети одного і того ж типу («Протон»), але 5 липня незабаром після старту КА квазіперіодичні процеси не

виникли. Справа у тому, що 5 липня ракета вибухнула на висоті близько 110 км, а її залишки – на висоті близько 25 км. При першому вибуху прореагували 50 т палива, а при другому – близько 66 т. Енерговиділення  $E$  склало близько 550 і 730 ГДж. Оцінимо характерний розмір області впливу і тривалість імпульсу ударної хвилі з наступних співвідношень:

$$R_{sw} = \sqrt[3]{\frac{E}{p_0}}, \quad \tau_{sw} = \frac{R_{sw}}{v_s},$$

де  $p_0$  – атмосферний тиск на висоті вибуху,  $v_s$  – швидкість звуку. Покладаючи для першого та другого вибухів значення тиску рівними  $3 \cdot 10^{-2}$  і  $3.5 \cdot 10^3$  Па відповідно, отримаємо, що  $R_{sw}$  складав 26 і 0.6 км, а  $\tau_{sw}$  – 79 і 1.8 с. Оскільки для першого вибуху приведена висота атмосфери  $H \approx 8$  км менше  $R_{sw}$ , продукти вибуху «прорвалися» крізь атмосферу.

Реакція від першого вибуху спостерігалась в інтервалах часу 14:54 – 14:58 UT і 15:03 – 15:05 UT. Значення квазіперіоду дорівнювало 7 – 9 хв.

Реакція на другий, низьковисотний і більш короточасний вибуховий процес, спостерігалась близько 15:09 UT.

Характерні швидкості поширення збурень від обох вибухів складали близько 470 – 500 м/с.

*Глобальні збурення.* Проаналізовано 32 старти КА різних типів, у тому числі і 19 стартів з космодромів США. Що стосується ракети «Pegasus», то вона занадто малопотужна, щоб викликати глобальні збурення. Спостереження за нею проводилися швидше для порівняння можливих ефектів від ракет різної маси та потужності.

Досить стійка реакція іоносфери для КА, що стартують з космодромів США та Франції, спостерігалася найчастіше через 60 – 80 хв після їхнього запуску (табл. 7.3). Траєкторії ракет різнилися, що і може пояснити варіації затримки від 60 до 100 хв. Якщо прийняти, що в середньому  $R \approx 10000$  км, то удавана

швидкість  $v \approx 2 - 3$  км/с. Таку швидкість в іоносфері мають повільні МГД-хвилі [65]. Вони відносяться до слабо загасаючих і тому відповідальні за глобальні збурення. Правдоподібним механізмом передачі збурень представляється такий. Збурення викликаються не роботою двигунів нульового та першого ступенів у приземній атмосфері, а функціонуванням двигунів інших ступенів (маневрових двигунів). І хоча їхня потужність значно менше, слід врахувати, що вони інжектують продукти згоряння безпосередньо у плазму. При цьому в останній ефективно збуджуються хвилі електромагнітної та МГД-природи. Нерідко спостерігалися збурення, що мають запізнення близько 6 – 7 хв (при  $R \approx 9000 - 10000$  км) тривалістю у десятки хвилин. Їм відповідає швидкість близько 25 км/с. Таку швидкість мають вже згадані гіротропні хвилі.

Таблиця 7.3

### Параметри глобальних збурень

Тип ракети (носій КА)	Кількість спостережень	Запізнення, хв	Тривалість, хв
«Space Shuttle»	5	60 – 80	5 – 15
«Ariane»	4	60 – 65	40 – 60
«Delta»	8	70 – 80	5 – 10
«Atlas»	4	70 – 100	~ 10
«Titan»	1	70	5
«Pegasus»	1	40, 90	10 – 20

*Глобальні ефекти при посадці КА.* Проаналізовано 6 посадок апаратів типу «Space Shuttle». Досить стійка реакція виникала за 60 – 80 хв до посадки, її тривалість – десятки хвилин. Наприклад, при посадці КА 28 грудня 1999 р. запізнення збурень по відношенню до здійснення гальмівного імпульсу (27 грудня

о 22:48 UT) склало близько 12 хв. Ця затримка визначена по зменшенню постійної складової у довгоперіодному спектрі доплерівського зміщення частоти і появи нових, не властивих F-області іоносфери, гармонік з  $T \approx 2, 4$  і 8 хв. Удавана швидкість поширення збурень – декілька десятків км/с. Швидше за все, і при посадці КА збурення переносяться за допомогою гіротропних хвиль.

Друга група квазіперіодичних збурень має запізнення  $\Delta t \approx 80$  хв,  $\Delta T \approx 40$  хв,  $T \approx 10$  і 20 хв. Якщо ці процеси пов'язані з включенням гальмівних двигунів, то їх удавана швидкість поширення порядку одиниць км/с. Таку швидкість, як уже зазначалося, мають повільні МГД-хвилі.

## **7.4 Фізичні процеси в геомагнітному полі, які супроводжували старти ракет**

### **7.4.1 Загальні відомості**

Крім збурень в атмосфері й іоносфері, збурення від ракет і КА можуть виникати й у магнітному полі Землі [41, 235, 385–387].

Метою цього дослідження є представлення результатів системного спектрального аналізу (ССА) часових варіацій в геомагнітному полі, пов'язаних із запусками двигуна підсистеми орбітального маневрування та стартами розгінних ступенів ракет «Союз» і «Протон» на космодромах Плесецьк і Байконур [249, 388].

### **7.4.2 Обладнання та методики**

Вимірювання були проведені за допомогою чутливого магнітометра-флюксометра, розташованого в Магнітній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (49°39' N, 36°56' E; 45°20' N геомагнітної широти та 119°20' E геомагнітної



довготи). Магнітометр видає цифрові відліки коливань геомагнітного поля з періодами 1 – 1000 с у геомагнітному напрямку південь–північ ( $H$ -компонента) та геомагнітний захід–схід ( $D$ -компонента). Мінімальні амплітуди коливань, які здатен фіксувати прилад, принципово обмежені рівнем внутрішнього шуму і становлять 0.5 – 500 пТл в діапазоні 1 – 1000 с відповідно. Приймач сигналів GPS використовується для синхронізації годинника магнітометра зі всесвітнім часом із похибкою, що дорівнює, або менше за  $\pm 0.5$  с [29, 41, 235].

ССА передувала смугова фільтрація в інтервалах 1 – 10 с, 10 – 100 с та 100 – 1000 с, а також ретельне вивчення стану космічної погоди. Інтервали часу з підвищеною магнітною активністю (індекси  $a_p \geq 3$ ,  $A_p \geq 3$ ,  $K_p \geq 1$ ,  $|D_{st}| \geq 8$  нТ) були виключені з подальшого аналізу. У ці проміжки часу варіації горизонтальних компонент були спричинені не запусками ракетних двигунів, а природними космічними джерелами.

У цьому підрозділі описано магнітні ефекти для найбільших космічних апаратів – «Союз» і «Протон» масою 297 тонн і 711 тонн відповідно. Проаналізовано ефекти від запусків ракет, які відбулися протягом інтервалу 2014 – 2017 років.

### 7.4.3 Результати спостережень

Зміни характеру варіацій геомагнітного поля пов'язані майже з усіма запусками ракет (див. рис. 7.15 – 7.18). На цих рисунках вертикальна безперервна лінія показує момент запуску ракети, вертикальна пунктирна лінія показує момент сходу Сонця. Амплітуда коливань найчастіше збільшується в 1.5 – 2 рази (до 1 – 2 нТл). Іноді вона зменшується, а хвилеподібні коливання, які існували до приходу хвильового збурення внаслідок запуску ракети, розрушуються. Часова затримка між стартом розгінних ступенів ракет і відгуком у геомагнітному полі

дорівнює приблизно 40 – 80 хв та 65 – 130 хв для космодромів Плесецьк і Байконур відповідно. Тривалість квазіперіодичних збурень (із періодом у діапазоні 10 – 15 хв) дорівнює 30 – 60 хв і слабо залежить від відстані між космодромами та Магнітною обсерваторією.

ССА дозволяє визначити затримку часу сигналу, його спектральний вміст і тривалість з похибкою, достатньою для багатьох практичних застосувань [29, 41, 235, 389–391].

#### **7.4.4 Механізми утворення та поширення магнітних збурень**

Швидкість поширення збурення може бути розрахована за відстанню між космодромом і Магнітною обсерваторією та затримкою часу між реакцією в геомагнітному полі та запусками двигуна підсистеми орбітального маневрування чи стартами розгінних ступенів. Вона виявляється залежною від стану геокосмосу, часу доби, пори року і дорівнює приблизно 0.3 – 0.6 км/с. Як відомо, така швидкість характерна для внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ) у земній атмосфері. Ці хвилі є хвилями у нейтральному середовищі з періодами приблизно 10 – 180 хв і мають гравітацію у якості повертаючої сили. У діапазоні періодів, що дорівнюють або перевищують 10 хв, їхня фазова швидкість менша, ніж швидкість звуку в атмосфері. Остання зростає з висотою від 0.3 до 1 км/с в діапазоні 100 – 400 км.

Відносна амплітуда ВГХ досягає максимального значення на висотах 200 – 250 км, де їхня фазова швидкість зазвичай не перевищує 0.5 – 0.6 км/с. Глибина їхнього затухання дорівнює 3000 – 5000 км, тому такі хвилі поширюються практично в глобальному масштабі.

ВГХ, поширюючись через атмосферу, модулюють електронну концентрацію в іоносфері, тобто генерують рухомі іоносферні збурення, від яких виникають періодичні зміни іоносферного струму. Останні призводять до

квазіперіодичних змін у геомагнітному полі з тим самим періодом. Шляхом моделювання нами було продемонстровано, що відносна амплітуда ВГХ 2 – 3%

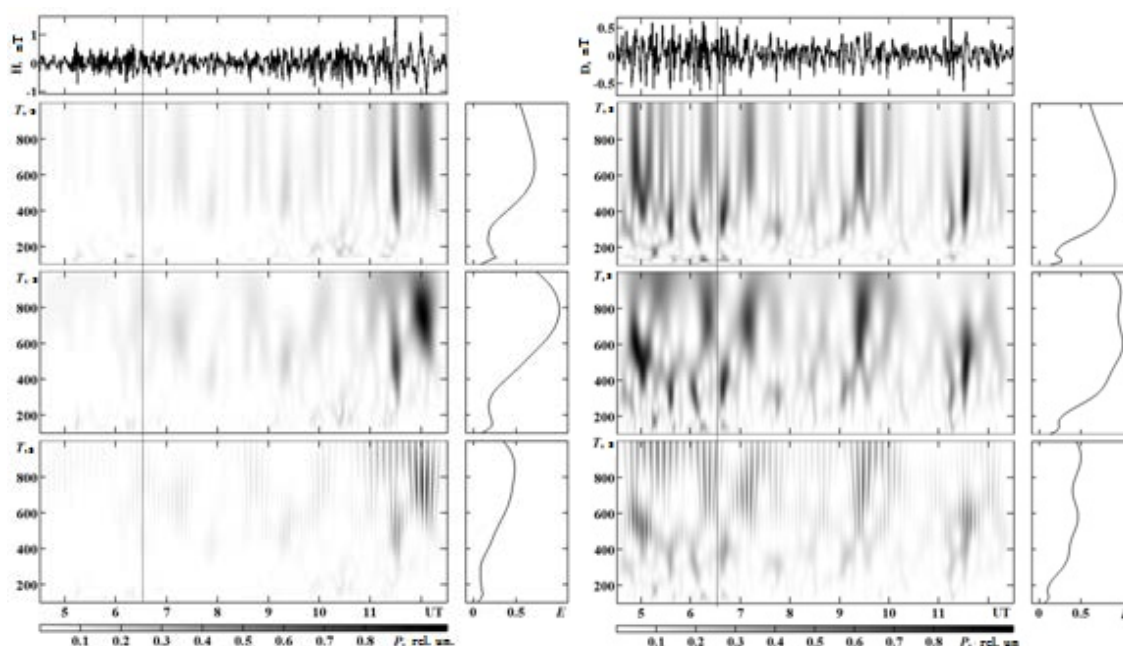


Рис. 7.15 Варіації  $H$ - і  $D$ -компонент в діапазоні періодів 100 – 1000 с під час старту 25.05.2017 р. носія Союз 2.1.6 з космодрому Плесецьк

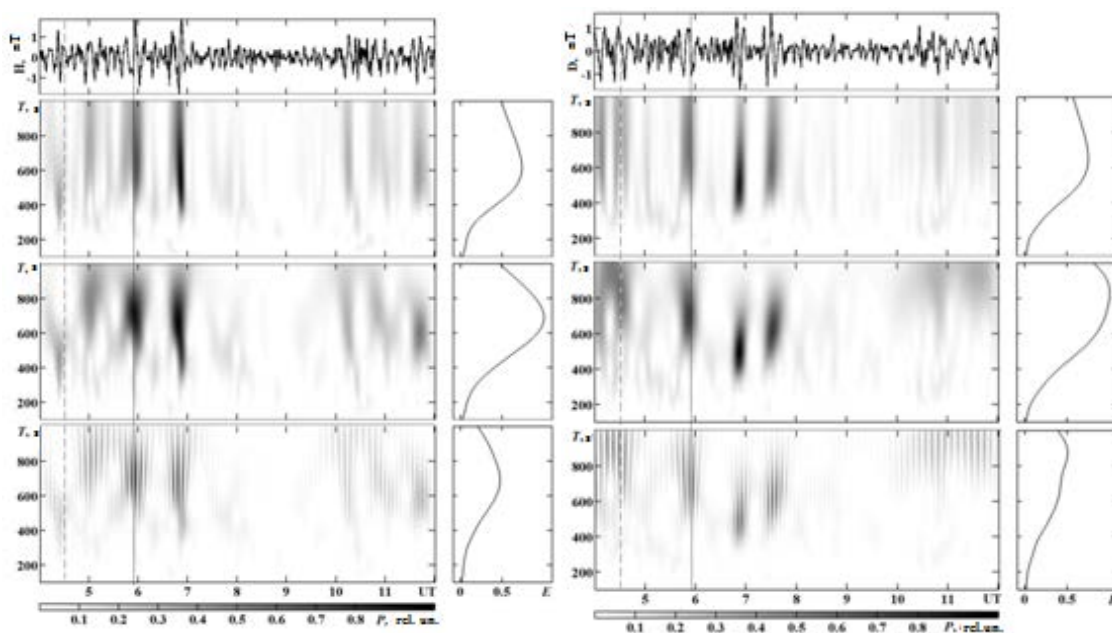


Рис. 7.16 Варіації  $H$ - і  $D$ -компонент в діапазоні періодів 100 – 1000 с під час старту 22.02.2017 р. носія «Союз У» з космодрому Байконур

спричиняє коливання горизонтальних компонент геомагнітного поля приблизно на 1 нТл, що спостерігалось в експериментах [235, 390].

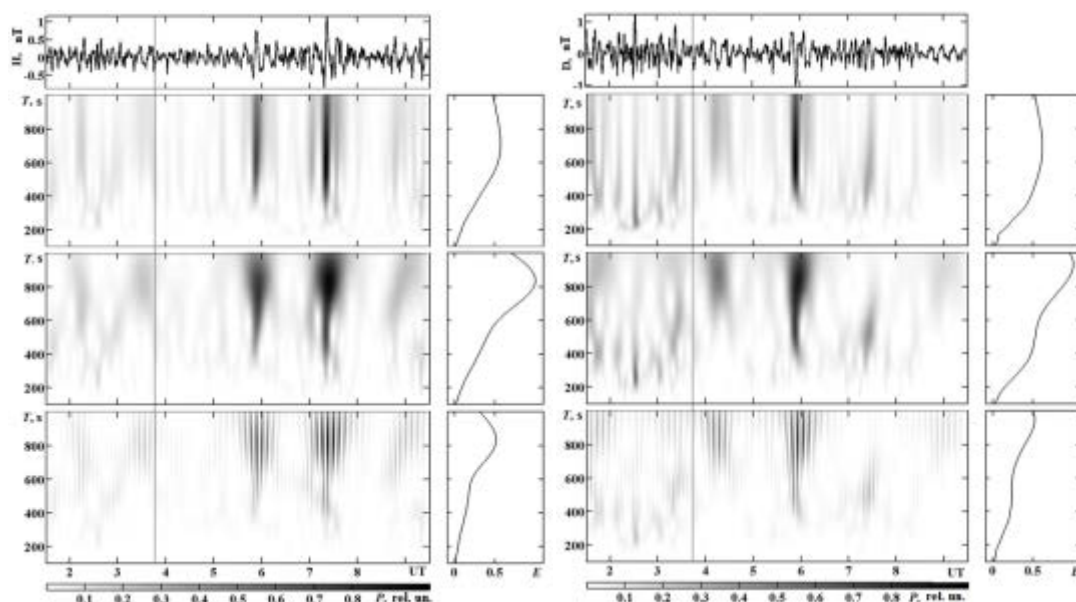


Рис. 7.17 Варіації  $H$ - і  $D$ -компонент в діапазоні періодів 100 – 1000 с під час старту 8.06.2017 р. носія «Протон М» з космодрому Байконур

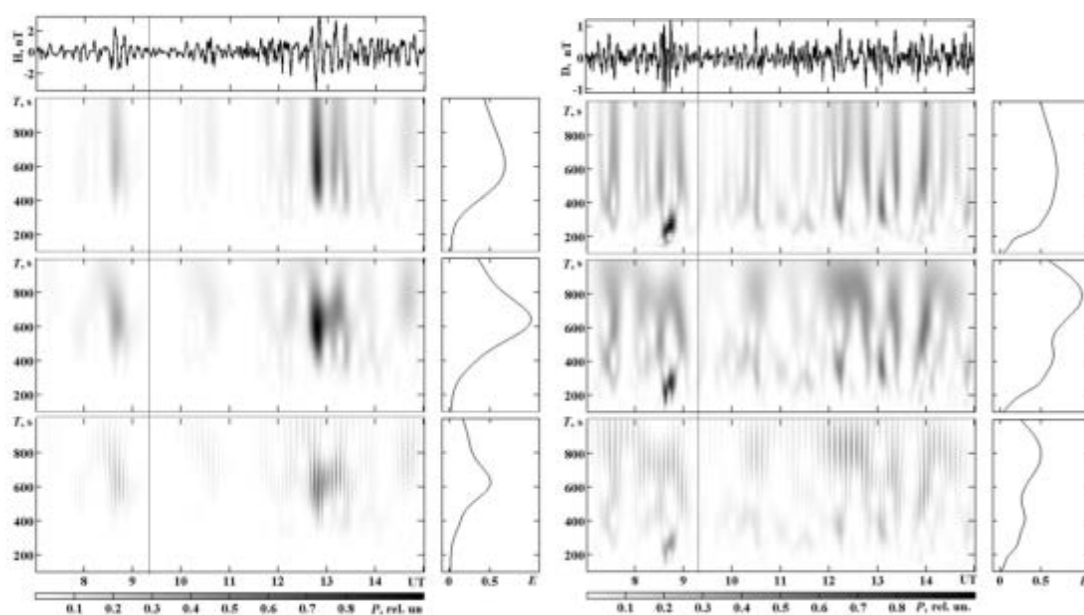


Рис. 7.18 Варіації  $H$ - і  $D$ -компонент в діапазоні періодів 100 – 1000 с під час старту 14.06.2017 р. носія Союз 2.1а з космодрому Байконур

## Висновки до розділу 7

1. Проведені багаторічні спостереження за варіаціями параметрів іоносфери та продемонстровано, що акустичні та гравітаційні хвилі від ракетних двигунів поширюються в іоносфері на відстані не менше 2300 км (для важких ракет і ракет середньої ваги). Часто після приходу зазначених збурень іоносфера на висотах F-області турбулізується і виникає ефект «розсіпання» доплерівських спектрів. Нерідко на відстанях до 2300 км від ракети спостерігаються більш швидкі збурення, ніж акустичні. Їхня швидкість становить 10 – 20 км/с. Як переносник при цьому можуть виступати гіротропні хвилі.

2. Встановлено, що при стартах КА в іоносфері спостерігаються збурення на віддаленні близько 10000 км. Механізм їхньої генерації може бути пов'язаний як з роботою найбільш потужних маршових двигунів в приземній атмосфері, так і з функціонуванням менш потужних двигунів останніх ступенів і маневрових двигунів в іоносфері. Друге пояснення більш правдоподібне тому, що має більш зрозумілий механізм генерації реактивним струменем електромагнітних хвиль і хвиль МГД типу у плазмі. Такими хвилями є гіротропні хвилі. За даними наших спостережень їхня швидкість становила 10 – 25 км/с.

3. Вперше встановлено, що приблизно за 60 – 80 хв до посадки КА в іоносфері фіксуються збурення тривалістю у кілька десятків хвилин, пов'язані, швидше за все, з включенням гальмівних (маневрових) двигунів. Удавана швидкість поширення цих збурень близько 10 – 20 км/с. Друга група збурень має швидкість 2 – 3 км/с.

4. У багаторічних експериментах спостерігалися три групи швидкостей: 0.5 – 0.7 км/с і менше, 2 – 3 км/с і 10 – 25 км/с. Швидше за все, їм відповідають акустико-гравітаційні, повільні МГД- і гіротропні хвилі відповідно.

5. Проведені багаторічні спостереження за варіаціями геомагнітного поля у діапазоні періодів 1 – 1000 с , які були пов’язані зі стартами розгінних ступенів ракет на різних космодромах у всьому світі та визначені основні параметри хвильових збурень (періоди, тривалість і швидкість поширення). Обґрунтовано механізм генерації магнітних збурень.

Результати цього розділу відображені в роботах автора [278, 329, 339, 340–343, 379–382].

## ВИСНОВКИ

1. Із огляду літератури за темою дисертації випливає, що адекватне дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, викликаних впливом високоенергетичних джерел, доцільно й обґрунтовано проводити в рамках системної парадигми, що враховує динамічні та нелінійні властивості відкритих систем ЗАІМ і СМСМІАЗ.

Продemonстровано, що цілий ряд джерел природної та техногенної природи мають значну енергетику, в результаті чого виникає взаємодія підсистем в системах ЗАІМ і СМСМІАЗ.

Продemonстровано, що землетрус супроводжується сейсмічним, тепловим, електричним, електромагнітним ефектами, генерацією сейсмічних, інфразвукових, внутрішніх гравітаційних і електромагнітних хвиль, варіаціями геофізичних полів.

Генеровані в процесі підготовки або протягом землетрусу збурення геофізичних полів і хвилі поширюються в атмосфері, іоносфері та магнітосфері, викликають вторинні ефекти і взаємодії підсистем в системі ЗАІМ. До вторинних ефектів відносяться іонізація приземної атмосфери радіоактивними газами, збурення параметрів глобального електричного кола, Джоулев нагрів іоносферної плазми, генерація ВГХ на іоносферних висотах, збурення іоносферно-магнітосферної плазми, системи іоносферно-магнітосферних струмів і іоносферно-магнітосферного електричного поля, збудження нестійкостей і турбулентності, генерація електромагнітних шумів у широкому діапазоні частот (від УНЧ до ВЧ), утворення іоносферно-магнітосферних дактів, висипання енергійних частинок з магнітосфери та ін.

Фізичні процеси, передуючі землетрусу (передвісники), у цілому подібні до процесів, які спостерігаються протягом землетрусів. Хоча передвісники мають меншу енергетику, зазвичай вони є спостережуваними.

Обґрунтовано положення про те, що тропічний циклон – одне з систематично виникаючих найвисокоенергетичніших великомасштабних атмосферних утворень на нашій планеті – є елементом системи океан – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Тропічні циклони відіграють визначальну роль у глобальному масо- та енергообміні в зазначеній системі, підтримують сприятливий для людини клімат на нашій планеті.

До цього часу побудовано основи схематизованої моделі основних процесів у системі океан – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Продемонстровано, що підсистеми та вся система в цілому є нелінійними. Вказані основні механізми взаємодії підсистем.

Між підсистемами мають місце прямі та зворотні зв'язки. Виникаючі при цьому процеси характеризуються значною енергетикою. Вплив циклону на верхню атмосферу, іоносферу та магнітосферу здійснюється, принаймні, по трьох каналах: акустико-гравітаційному, електромагнітному та електричному, з якими пов'язані генерація хвиль і полів відповідної природи. Дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур – найважливіший науковий напрям у космічній геофізиці.

З огляду на багатогранність проявів геокосмічних бур, через відносну індивідуальність і унікальність кожної бурі, вивчення фізичних ефектів геокосмічних бур далеко до завершення.

Крім задач всебічного дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур, необхідно їх детальне адекватне моделювання та прогнозування.

Проліт і вибух Челябінського метеороїда викликав цілий комплекс, як короткоіснуючих ( $\sim 1$  с), так і довгоіснуючих (години, тижні і навіть багато місяців) фізичних (і не тільки фізичних) процесів в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (внутрішні оболонки). Висота основного енерговиділення приблизно дорівнювала 23 км. В процесі вивчення фізичних ефектів, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда, виявлено кілька нових явищ.



Вперше приблизно на широті Челябінська спостерігався довгоіснуючий (кілька місяців) пояс пилу.

Вперше спостерігалися кам'яні нитки базальту або піроксену, що утворилися при високотемпературному руйнуванні Челябінського космічного тіла.

Вперше встановлено, що за 50–30 хв до вибуху метеороїда, тобто при його русі в магнітосфері, а потім в термосфері та іоносфері, швидше за все, виникли первинні ефекти.

Проліт і вибух Челябінського тіла в стратосфері викликав вторинні ефекти в літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, тобто у всій системі ЗАІМ. Важливо, що збурення, викликані вибухом Челябінського тіла, поширювалися як по вертикалі на сотні кілометрів вгору, так і по горизонталі на відстані в тисячі кілометрів.

Реєстровані збурення виникли не тільки в атмосфері, але й в іоносфері, а також геомагнітному полі, тобто в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля.

Старти і польоти ракет з працюючими двигунами, маневри та посадка космічних апаратів є зручним, гнучким і перспективним різновидом активних експериментів у системі ЗАІМ.

Важливо, що ракетно-космічна техніка (РКТ), що запускається з різних космодромів світу, яка має різну потужність, різний склад палива та різні траєкторії, забезпечує варіювання «початкових умов» і гнучкість у дослідженні реакції підсистем і системи ЗАІМ в цілому.

РКТ справляє комплексний вплив на підсистеми в системі ЗАІМ, а саме сейсмічний, динамічний, тепловий, акустичний, магнітогідродинамічний та електромагнітний впливи. Тому канали впливу РКТ на систему ЗАІМ надзвичайно різноманітні. Вони являють собою цілий ряд пов'язаних між собою груп. Кожна група асоціюється з певними фізичними процесами і збуреннями в системі ЗАІМ.

У літературі основна увага приділялася хвильовим процесам, які супроводжували старти і маневри РКТ. Саме ці процеси найбільш суттєві на

великих ( $\sim 1\text{--}10$  тис. км) віддаленнях від траєкторії РКТ. Хвильові процеси призводять до взаємодії підсистем у системі ЗАІМ. АГХ, що генеруються в атмосфері, зумовлюють виникнення РІЗ. Останні викликають квазіперіодичну модуляцію іоносферних струмів і, в кінцевому підсумку, генерацію геомагнітних пульсацій з відповідними періодами.

Крім ударних хвиль і АГХ, польоти РКТ служать джерелом й інших хвиль, швидкості яких складають одиниці, а можливо, і десятки кілометрів в секунду. Ними можуть бути як повільні МГД, так і гіротропні хвилі. І ті, і інші спостерігалися не так впевнено, як ударні хвилі й АГХ.

Крім наукової значущості, ефекти, що супроводжували функціонування РКТ, мають і прикладну значимість. Для радіофізики і радіофізичних застосувань важливо, що збурення в навколоземному середовищі суттєво впливають на поширення радіохвиль ДНЧ – ДВЧ діапазонів, а значить і на роботу систем телекомунікацій, радіолокації, дистанційного радіозондування та моніторингу середовищ. Плазма факела ракети суттєво змінює провідність, відбивні та розсіюючі властивості середовища, суттєво змінюючи параметри радіоканалів.

Дослідження викликаних польотами РКТ збурень в атмосфері та геокосмосі, засмічення геокосмосу сміттям і чужорідною речовиною будуть ще довго залишатися актуальними.

2. Обґрунтовано, що утворення СМСМІАЗ і ЗАІМ є складними відкритими динамічними нелінійними та стохастичними системами. Розвинені основні положення системної парадигми. До найважливіших властивостей систем СМСМІАЗ і ЗАІМ відноситься їх нелінійність, можливість самоорганізації, хаотизації та появи тригерних механізмів вивільнення енергії.

Високоенергійні явища (землетруси, вулканізм, грози, потужні атмосферні процеси, тропічні циклони, термінатор, затемнення Сонця, спалахи на Сонці, геокосмічні бурі й т.п.) викликають комплекс процесів у системах СМСМІАЗ і ЗАІМ, призводять до перебудови характеру взаємодій підсистем, до накопичення й вивільнення енергії.

Важливо, що потоки енергії “зверху” і “знизу”, а також від антропогенних джерел можуть бути порівнянними. Активні експерименти (вибухи, старти ракет і т.п.) виявляються зручними й ефективними засобами для моделювання взаємодії підсистем. Особлива роль у взаємодії підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ належить хвильовим процесам.

Висипання енергійних електронів у середніх широтах супроводжує більшість нестационарних процесів у системах СМСМІАЗ і ЗАІМ. Їх потоки складають величину порядку  $10^7\text{--}10^9\text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Виявлено й обґрунтовано механізми, що призводять до висипання частинок.

Системна парадигма повинна стати основою теорії, методом і методологією вивчення систем СМСМІАЗ і ЗАІМ як складних відкритих дисипативних динамічних нелінійних об’єктів.

3. Проліт і вибух Челябінського космічного тіла викликав у всіх геоболонках помітні (або сильні) збурення. За результатами моделювання висота вибуху Челябінського тіла була близька до 25 км.

Надлишок тиску на поверхні Землі поблизу епіцентру вибуху склав одиниці кілопаскалей. Цього виявилось достатньо для того, щоб викликати руйнування елементів конструкцій споруд на площі близько 6 тис. км<sup>2</sup>.

Енергія і потужність світлового спалаху склала близько 375 ТДж та 313 ТВт відповідно. Енергія спалаху на 1 – 2 порядки була менше енергії, при якій виникає займання речовин і пожежі.

Енергія вибухової хвилі і акустичних коливань була близька до 560 і 19 ТДж.

Магнітуда землетрусів, спричинених вибухом Челябінського тіла, не перевищувала 3 – 4.

Відносні збурення тиску повітря і концентрації електронів на іоносферних висотах над епіцентром вибуху досягали сотень процентів.

Збурення геомагнітного поля поблизу вибуху Челябінського тіла складало 0.5–1 нТл.

Помітні збурення від вибуху поширювалися на горизонталі на відстані в кілька тисяч кілометрів.

Космічні тіла, подібні Челябінському астероїду, падають на Землю у середньому з частотою один раз на 65 років.

За часовими варіаціями доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналів похилого зондування іоносфери на 6 радіотрасах виявлені іоносферні збурення, що послідували за прольотом і вибухом 18 грудня 2018 р. Камчатського метеороїда з початковою кінетичною енергією 173 кт ТНТ. Збурення мали 2 – 3 групи часів запізнення. Залежно від відстані між місцем вибуху метеороїда та серединою радіотраси ці часи змінювалися в межах 24 – 43 хв, 93 – 136 хв і 141 – 183 хв. Їм відповідали удавані швидкості 1.9 – 2.9 км/с, 620 – 770 м/с і 310 – 500 м/с. Збурення, що мали удавані швидкості у сотні метрів за секунду, а також періоди близько 10 – 15 хв, переносяться атмосферними гравітаційними хвилями. Збурення, яким відповідає удавана швидкість 1.9 – 2.9 км/с, могли бути обумовлені іоносферними процесами, викликаними сейсмічною хвилею від вибуху метеороїда.

4. Вивчено добові та сезонні залежності величини, напрямку, зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості в мезосфері.

Показано, що його значення зазвичай становить 10 – 80 м/с при абсолютній похибці 3 – 7 м/с. Виявлені значні варіації модуля швидкості (в 2 – 5 разів) і її напрямку (на 140 – 180°), викликані, ймовірно, проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль і їх гармонік. У дні, близькі до весняного і осіннього рівнодення, виявлено підсилення цих варіацій, пов'язане з глобальною перебудовою циркуляції атмосфери на мезосферних висотах, що сприяє підсиленню інтенсивності атмосферних хвиль.

Досліджено параметри турбулентної швидкості для різних часів спостереження. Показано, що величина її стандартного відхилення на висотах 85 – 95 км лежить в межах 2 – 6 м/с (абсолютна похибка склала 0.3 – 0.8 м/с). Наведені механізми виникнення турбулентної структури в мезосфері. Підтверджений взаємозв'язок характеристик спрямованого та турбулентного руху (коефіцієнт кореляції зазвичай становив 0.5 – 0.8).

Описано причини завищення реальних значень стандартного відхилення хаотичної швидкості при їх визначенні методом повного кореляційного аналізу.

Виявлено хвильові варіації зональної та меридіональної складових вектора швидкості вітру з періодами 10 – 120 хв. Показано, що амплітуди цих коливань зазвичай не перевищують 8 м/с. Варіації амплітуд коливань викликані дисипацією та нелінійною взаємодією атмосферних хвиль з різноманітними періодами.

Проаналізовані можливі джерела генерації хвиль різної фізичної природи і механізми проникнення останніх на мезосферні висоти. Підтверджений динамічний взаємозв'язок підсистем у системах ЗАІМ і СМСМІАЗ через хвильові процеси.

5. Нагрів електронів надкоротким радіоімпульсом на висотах 30 – 60 км суттєвий вже при  $\tau = 1$  нс та  $P = 1$  ГВт. Пробій атмосфери на висотах 30 – 60 км настає вже при  $P_{\min}=0.3\text{--}1.3$  ГВт і  $f \approx 10$  ГГц. При зменшенні частоти до 1 ГГц  $P_{\min}$  збільшується до 1 – 30 ГВт. Для оптимізації процесу пробою атмосфери на висотах 30 – 60 км радіоімпульсами  $P_{\min}$  необхідно збільшити приблизно в 25 – 64 рази.

6. Продемонстрована можливість спостереження на відстанях  $\sim 1\text{--}2$  тис. км динамічних процесів у іоносфері, супутніх землетрусу помірної сили ( $M \approx 5.9$ ).

Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів.

Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період 4–5 хв), згенеровані поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу.

Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів при цьому становила 4.5–9 %. Тривалість цуга коливань була в межах 24–55 хв. Швидкість поширення хвильових збурень була близько 3 км/с.

Виявлено хвильові збурення (період 15–30 хв), які могли бути згенеровані поблизу епіцентру та поширювалися від нього у вигляді атмосферних гравітаційних хвиль, модулюючих концентрацію електронів у іоносфері. Відносна

амплітуда квазіперіодичних збурень концентрації електронів становила 30–55 %. Тривалість хвильового цуга досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с.

Проведено аналіз результатів багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери в день помірного ( $M \approx 6.6$ ) землетрусу в Японії 5 вересня 2018 р. і в контрольні дні.

Виявлено, що характер варіацій доплерівських спектрів, доплерівського зміщення частоти основної моди й амплітуди сигналу в день землетрусу і в контрольні дні помітно відрізнявся.

Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень: 3.3 км/с і близько 0.5 км/с. Перша швидкість близька до швидкості сейсмічних хвиль, а друга – до швидкості акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. За нашими оцінками, амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової та атмосферної гравітаційної хвиль була  $\sim 0.15$ – $0.31\%$  і 7–8% відповідно.

На відстанях 1–2 тис. км від епіцентру помірного ( $M = 6.0$ ) землетрусу в Японії 11 квітня 2019 р. виявлена реакція іоносфери на сейсмічну подію. Землетрус супроводжувався розширенням доплерівських спектрів на 1–1.5 Гц в діапазоні частот 5 – 9.8 МГц, генерацією АГХ, що мають швидкість 0.5–1 км/с і період 8 – 20 хв, і генерацією інфразвуку з періодом 2–5 хв, що мають швидкість 0.3–0.4 км/с.

Відносні збурення концентрації електронів складали  $\sim 1$ – $10\%$ . Загальним для іоносферних ефектів землетрусів було наступне.

Землетруси супроводжувалися розширенням доплерівських спектрів і аперіодичними та квазіперіодичними збуреннями, що були нехарактерними для контрольних днів.

Для всіх землетрусів удавана швидкість складала близько 3 і 0.3 км/с. Збурення концентрації електронів сягали від 1% до  $\sim 10\%$  і більше.

7. Аналіз стану космічної погоди 7–14 жовтня 2004 р. показав, що іоносферні умови були сприятливими для пошуку реакції навколишнього середовища на дію супертайфуну Hagibis.

За допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена та досліджена реакція іоносфери на дію супертайфуну Hagibis. Дія супертайфуну супроводжувалась підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувались хвильові процеси з періодом від 2 до 7 хв і від 12–15 до 60–150 хв.

Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалась за допомогою акустико-гравітаційних хвиль.

Найбільший вплив на іоносферу виявлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику (8, 10 і особливо 9 жовтня 2019 р.). При цьому супертайфун знаходився на відстані ~2500 – 3000 км від середини радіотрас похилого зондування.

Під дією хвильових процесів 9 жовтня 2019 р. висота відбиття радіохвиль коливалась в межах (від  $\pm 30$ –50 км до  $\pm 60$ –90 км). Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів у F-області іоносфери змінювалась від 10 – 12% для періодів ~20 хв до 30 – 60% для періодів ~60 – 120 хв.

Виявлено прояви інфразвукових коливань в іоносфері. Період інфразвуку змінювався від 2 до 7 хв, залежно від висоти зондування. Відносна амплітуда квазіперіодичних коливань електронної концентрації коливалась у діапазоні 0.2–0.4%.

8. Аналіз часових варіацій електронної концентрації на висотах 73.5 –82.5 км під час дуже сильної геокосмічної бурі 7–11 листопада 2004 р. виявив збільшення її середніх значень (на 50–100%) та амплітуд її варіацій (у деяких сплесках в 3–5 разів) у магнітозбуренні дні. Значення хвильових збурень у відносних амплітудах протягом бурі зазвичай становили 0,05–0,15, а під час другого магнітного збурення (10 листопада 2004 р.) спостерігалось невелике збільшення їхніх значень. Чіткого зв'язку між рівнем магнітної активності та параметрами

хвильових збурень у нижній іоносфері не виявлено.

Зафіксовано значне (на порядок і більше) збільшення варіацій і стандартних відхилень горизонтальних складових магнітного поля в магнітно-збурені періоди 7–14 листопада 2014 р. Спостерігались сплески  $Pc5-6$  з амплітудами, що досягали 30 та 50 нТл для  $H$ - і  $D$ -компонент відповідно. Протягом деяких проміжків часу мав місце взаємозв'язок між пульсаціями  $Pc5-6$  та короткочасними (5–15 хв) хвильовими збуреннями електронної концентрації нижньої іоносфери. Ця взаємодія може бути спричинена як стимуляцією магнітними пульсаціями квазіперіодичного середньоширотного висипання електронів з магнітосфери, так і генерацією  $Pc5-6$  пульсацій і атмосферних гравітаційних хвиль в полярних районах і їх поширенням до середніх і більш низьких широт.

9. Багаточастотні багатотрасові спостереження за динамікою іоносфери під час іоносферної бурі 14 травня 2019 р. дозволили встановити наступне. В інтервалі часу з 06:00 до 11:00 мала місце позитивна іоносферна буря. Встановлено, що  $f_oF_2$  при цьому збільшувалася від  $\sim 5$  до 7 – 8 МГц.

Іоносферна буря призвела до зміщення вгору області відбиття радіохвилі в залежності від радіотраси на  $\sim 50 - 180$  км. Протягом бурі спостерігалися прояви атмосферних гравітаційних хвиль з періодом 15 – 30 хв. Амплітуда відносних збурень концентрації електронів становила 4 – 8%.

Буря супроводжувалася генерацією інфразвуку з періодом близько 5 хв. При цьому амплітуда відносних збурень концентрації електронів була близько 0.7%.

Дослідження іоносферних бур у широкому діапазоні висот методом некогерентного розсіяння дозволило виявити позитивні та негативні іоносферні бурі, значне збільшення температури електронів, несуттєве збільшення температури іонів, значні варіації відносної концентрації іонів водню та динаміки іоносферної плазми.

10. Запропонована нова класифікація іоносферних бур в залежності від геомагнітної обстановки.

До першої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжують сильні магнітні бурі ( $K_p \geq 8$ ).



До другої групи належать сильні іоносферні бурі, що супроводжували незначні магнітні бурі ( $K_{p\max} = 5$ ).

До третьої групи належать помірні іоносферні бурі, які супроводжуються сильними магнітними бурями. Природно, що помірні іоносферні бурі супроводжують помірні магнітні бурі.

11. Продемонстровано, що акустичні та гравітаційні хвилі від ракетних двигунів поширюються в іоносфері на відстані не менше 2300 км (для важких ракет і ракет середньої ваги).

Часто після приходу зазначених збурень іоносфера на висотах F-області турбулізується і виникає ефект «розсіпання» доплерівських спектрів. Нерідко на відстанях до 2300 км від ракети спостерігаються більш швидкі збурення, ніж акустичні. Їхня швидкість становить 10 – 20 км/с. Як переносчик при цьому можуть виступати гіротропні хвилі.

Встановлено, що при стартах КА в іоносфері спостерігаються збурення на віддаленні близько 10000 км. Механізм їхньої генерації може бути пов'язаний як з роботою найбільш потужних маршових двигунів в приземній атмосфері, так і з функціонуванням менш потужних двигунів останніх ступенів і маневрових двигунів в іоносфері. Друге пояснення більш правдоподібне тому, що має більш зрозумілий механізм генерації реактивним струменем електромагнітних хвиль і хвиль МГД-типу у плазмі. Такими хвилями є гіротропні хвилі. За даними наших спостережень їхня швидкість становила 10 – 25 км/с.

Вперше встановлено, що приблизно за 60 – 80 хв до посадки КА в іоносфері фіксуються збурення тривалістю у кілька десятків хвилин, пов'язані, швидше за все, з включенням гальмівних (маневрових) двигунів. Удавана швидкість поширення цих збурень близько 10 – 20 км/с. Друга група збурень має швидкість 2–3 км/с. У багаторічних експериментах спостерігалися три групи швидкостей: 0.5 – 0.7 км/с і менше, 2 – 3 км/с і 10 – 25 км/с. Швидше за все, їм відповідають акустико-гравітаційні, повільні МГД- і гіротропні хвилі відповідно.

Проведені багаторічні спостереження за варіаціями геомагнітного поля у діапазоні періодів 1 – 1000 с, які були пов'язані зі стартами розгінних ступенів

ракет на різних космодромах у всьому світі та визначені основні параметри хвильових збурень (періоди, тривалість і швидкість поширення). Обґрунтовано механізм генерації магнітних збурень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черногор Л. Ф. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система // Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. – 2002. – № 570, вип. 2. – С. 175–180.
2. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
3. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, №5/6. – С. 96–105.
4. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
5. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
6. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – Москва: Советская энциклопедия, 1986. – 784 с.
7. Fuller–Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? // Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.). Magnetic Storm. – Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1997.
8. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere // Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Yohsuke Kamide, John K. Arballo (eds.) Magnetic Storm. – Geophysical Monograph 98, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1997.
9. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. – 408 с.

10. Chernogor L. F. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 32, N 11. – P. 3199–3218.
11. Монин А. С., Шишков Ю. А. Климат как проблема физики // *УФН*. – 2000. – Т. 170, № 4. – С. 419–445.
12. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 319 с.
13. Моисеева Н. И., Сысуев В. М. Временная среда и биологические ритмы. – Ленинград: Наука, 1981. – 126 с.
14. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. – Москва: Мир, 1982. – 384 с.
15. Пудовкин М. И., Распопов О. М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1992. – Т. 32, № 5. – С. 1–22.
16. Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2000. – Т. 40, № 5. – С. 3–14.
17. Авакян С. В. Физика солнечно-земных связей: некоторые результаты, проблемы и новые подходы // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2008. — Т. 48, № 4. — С. 435–442.
18. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта „Попередження” // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 38–47.
19. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // *Космічна наука і технологія*. – 2006. – Т. 12, № 2/3. – С. 16–26.
20. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
21. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.

22. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26, № 4. – С. 31–44.

23. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 61–73.

24. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах – источник экологических катастроф в Украине // Екологія і ресурси. – 2004. – № 10. – С. 55–67.

25. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 6. – С. 522–535.

26. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 4. – С. 359–369.

27. Черногор Л. Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах – источник экологических катастроф в Украине // Екологія і ресурси. – 2008. – № 3. – С. 56–72.

28. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март – апрель 2003 г.) // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, № 2/3. – С. 13–33.

29. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 386 с.

30. Chernogor L. F., Garmash K. P. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – Vol. 58, N 5. – P. 673–685.

31. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Ultra-Wideband Infrasonic Signals Generated by Series of Chemical Explosions // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. Conference Proceedings. – P. 318–321.

32. Шевелев Н. Б., Лящук А. И., Черногор Л. Ф. Инфразвуковые сигналы, сгенерированные взрывами на военной базе вблизи города Винница // 18 Українська конференція з космічних досліджень. Київ, Україна, 17 – 20 вересня 2018. Тези доповідей конференції. – С. 51.

33. Черногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів // Вип. 5. Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: зб. пр. V-ї наук.-техн. конф. Львів, 4 – 5 жовтня 2018 р. // Львів: ФМІ НАНУ, 2018. – С. 99 – 103.

34. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot // Proceedings of the XIX<sup>th</sup> International young scientists' conference on applied physics. May 21 – 25, 2019, Kyiv, Ukraine. – P. 100–101.

35. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot // Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 – May 31, 2019. – P. 90–91.

36. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Системный спектральный анализ инфразвуковых сигналов, сгенерированных в течение техногенной катастрофы // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XVI Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». – 16–21 сентября 2019 г. – Иркутск, 2019. – С. 178–180.

37. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Временной и системный спектральный анализы инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных в течение техногенной катастрофы // Космічна наука і технологія. – 2020. – Т. 26, № 3 (124). – С. 81–96.

38. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном

регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 130–151.

39. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Занимонский Е. М., Лизунов Г. В., Лисаченко В. Н. Связь атмосферной и космической погодных систем // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 5. – С. 6–36.

40. Черногор Л. Ф. Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 463–472.

41. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. – Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2018. – 542 P.

42. Клумов Б. А., Кондауров В. И., Конюхов А. В., Медведев Ю. Д., Сокольский А. Г., Утюжников С. В., Фортов В. Е. Столкновение кометы Шумейкер–Леви с Юпитером: Что мы увидим? // Успехи физ. наук. – 1994. – Т. 164, № 6. – С. 617–629.

43. Гуттенберг Б. Физика земных пород. – М.: Иностранная литература, 1963. – 264 с.

44. Стейси Ф. Физика Земли. – Москва: Мир, 1972. – 342 с.

45. Bolt B. A. Seismic Air Waves from the Great 1964 Alaskan Earthquake // Nature. – 1964. – Vol. 202, N 4937. – P. 1095–1096.

46. Donn W. L., Posmentier E. S. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake // J. Geophys. Res. – 1964. – Vol. 69, N 24. – P. 5357–5361.

47. Davies K., Baker D. M. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964 // Journal of Geophysical Research. – 1965. – Vol. 70, N 9. – P. 2251–2253.

48. Row R. V. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964 // Journal of Geophysical Research. – 1966. – Vol. 71, N 1. – P. 343–345.

49. Пустоветов В. П., Гинзбург Е. В., Малышев А. Б., Прошкина И. П. О вариациях потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космические исследования. – 1993. – Т. 31, № 3. – С. 123–127.
50. Пустоветов В. П., Малышев А. Б. Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космические исследования. – 1993. – Т. 31, № 5. – С. 84–90.
51. Гинзбург Е. В. Корреляция сильных землетрясений с вариациями потока частиц радиационного пояса / Е. В. Гинзбург, А. Б. Малышев, И. П. Прошкина, В. П. Пустоветов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34, № 3. – С. 60–66.
52. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М. А. Садовского. – Москва: Наука, 1982. – 160 с.
53. Электрические и магнитные предвестники землетрясений / Под ред. В. П. Головкова. – Ташкент: ФАН, 1983. – 135 с.
54. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Герасимович Е. А., Матвеев И. В. оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. – Москва: Наука, 1985. – 116 с.
55. Поиск предвестников землетрясений. Под редакцией М. Б. Гохберга. – Москва: Наука, 1988. – 143 с.
56. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – Москва: Наука, 1992. – 304 с.
57. Бучаченко А. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А., Сорокин В. М., Страхов В. Н., Чмырев В. М. Ионосферные предвестники землетрясений // УФН. – 1996. – Т. 166, № 9. – С. 1023–1029.
58. Elecromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction / Edited by M. Hayakava and Y. Fuljinawa. – Tokyo: TERRAPUB, 1994. – 512 p.
59. Pulinets S., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. – Berlin: Springer–Verlag, 2004. – XIII, 315 p.
60. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – Москва: Наука. 2008. – 295 с.



61. Сорокин В. М., Чмырев В. М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 6. – С. 821–830.

62. Pulinetz S. A., Ouzounov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system // Geomagn. Aeron. – 2015. – Vol. 55, Is. 4. – P. 521–538.

63. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59, № 3. – С. 400–408.

64. Пасечник И. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – Москва: Наука, 1970. – 192 с.

65. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 136 с.

66. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Леус С. Г., Пахомова О. В., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных, воздушных взрывов и землетрясений // Физика космической плазмы. Сборник трудов Международного семинара, 6–10 июня 1993 года, Киев, Украина. – Киев: Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка, 1994. – С. 151–160.

67. Heki K., Ping J. Directivity and apparent velocity of the coseismic traveling ionospheric disturbances observed with a dense GPS array / K. Heki // Earth Planet. Sci. Lett. – 2005. – Vol. 236, N 3–4. – P. 845–855.

68. Calais E., Minster J. B., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionosphere signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // Geophys. J. Int. – 1998. – Vol. 132, N 1. – P. 191–202.

69. Calais E., Minster J. B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake // Geophys. Res. Lett. – 1995. – Vol. 22, N 9. – P. 1045–1048.

70. Федоренко А. К., Лизунов Г. В., Роткель Х. Спутниковые наблюдения квазиволновых возмущений атмосферы на высотах области F, вызванных мощными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 3. – С. 403–410.

71. Доильница Э. Г., Дробязко И. Н., Павлов В. А. О влиянии землетрясений на концентрацию электронов в слое F ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1981. – Т. 24, № 7. – С. 783–793.

72. Ducic V., Artru J., Lognonne P. Ionospheric remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves // Geophys. Res. Lett. – 2003. – Vol. 30, N 18. – P. 8-1–8-4.

73. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L. Long-distance propagation of traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // Earth, Planets and Space. – 2006. – Vol. 58. – P. 1025–1031.

74. Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., Hemmakorn N., Komolmis T., Maruyama T. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111, N B9. – P. B09313.

75. Кирюшкин В. В., Афраимович Э. Л., Астафьева Э. И. Эволюция сейсмо-ионосферных возмущений по данным плотной сети станции GPS // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 3. – С. 236–248.

76. Wang Q., Xu X., Jiang Z., Suppe J. A possible precursor prior to the Lushan earthquake from GPS observations in the southern Longmenshan // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, N 1.

77. Zhu F., Jiang Y. Investigation of GIM-TEC disturbances before  $M \geq 6.0$  inland earthquakes during 2003–2017 / F. Zhu, Y. Jiang // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, N 1. – 18038.

78. Melgarejo-Morales A., Vazquez-Becerra G. E., Millan-Almaraz J. R., Pérez-Enríquez R., Martínez-Félix Carlos A., Gaxiola-Camacho J. Ramon. Examination of seismo-ionospheric anomalies before earthquakes of  $M_w \geq 5.1$  for the period 2008–2015 in Oaxaca, Mexico using GPS-TEC // Acta Geophys. – 2020. – Vol. 68. – P. 1229–1244.

79. Luo Y., Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Yu. Сейсмо-іоносферні ефекти: результати похилого радіозондування іоносфери // Радіофізика і радіоастрономія. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 218–230.

80. Hayakawa M., Nickolaenko A. P., Galuk Y. P., Kudintseva I. G. Scattering of Extremely Low Frequency Electromagnetic Waves by a Localized Seismogenic Ionospheric Perturbation: Observation and Interpretation // Radio Science. American Geophysical Union (AGU). – 2020. – Vol. 55, N 12.

81. Афраймович Э. Л., Кирюшкин В. В., Перевалова Н. П. Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 7. – С. 822–830.

82. Павлов В. А. Акустический импульс над эпицентром землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. – 1986. – Т. 26, № 5. – С. 807–815.

83. Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – Москва: МИФИ, 2000. – 448 с.

84. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Мейстер К. В., Липеровская Е. В. Физические модели связей в системе литосфера – атмосфера – ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 6. – С. 831–843.

85. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М., Федорович Г. В. О генерации геомагнитных генераций акустическими колебаниями во время землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 3. – С. 58–68.

86. Павлов В. А. Воздействие землетрясений и извержений вулканов на ионосферную плазму // Изв. вузов. Радиофизика. – 1979. – Т. 22, № 4. – С. 19–37.

87. Mikumo T., Shibutani T., Le Pichon A., Garces M., Fee D., Tsuyuki T., Watada S., Morii W. Low-frequency acoustic-gravity waves from coseismic vertical deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake ( $M_w \approx 9.2$ ) // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2008. – Vol. 113, Is. B12. – id. B12402.

88. Гармаш К. П., Гоков А. М., Гритчин А. И., Мисюра В. А., Черногор Л. Ф. Исследование реакции нижней ионосферы на удаленные мощные землетрясения // Радиотехника. – 1990. – Вып. 95. – С. 52–56.

89. Baba K., Hayakawa M. The Effect of Localized Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation on the Basis of the Finite Element Method. In book: *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Hayakawa M., Fujinawa Y., editors. Tokyo: Terra Sci Publ. Comp., 1994. – P. 399 – 407.

90. Calais E., Minster J. B., Bernard J. GPS, Earthquake, the ionosphere and Space Shuttle // *Physics of Earth and Planet.* – 1998. – Vol. 105, N 3–4. – P. 167 – 181.

91. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., Plotnikov A. V., Uralov A. M. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // *Annales Geophysicae*. – 2001. – Vol. 19, N 4. – P. 395–409.

92. Garcia R., Crespon F., Ducic V., Lognonné P. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data // *Geophys. J. Int.* – 2005. – Vol. 163, N 3. – P. 1049–1064.

93. Afraimovich E. L., Astafieva E. I., Kirushkin V. V. Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. – 2006. – Vol. 6. – P. GI2002.

94. Liu J. Y., Tsai Y. B., Chen S. W., Lee C. P., Chen Y. C., Yen H. Y., Chang W. Y., Liu C. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004 // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – Vol. 33, N 2. – P. L02103.

95. Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // *Earth, Planets and Space*. – 2007. – Vol. 59. – P. 1015–1026.

96. Fedorenko A. K., Lizunov G. V., Rothkaehl H. Satellite observations of quasi-wave atmospheric disturbances at heights of the F region caused by powerful earthquakes // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2005. – Vol. 45, N 3. – P. 380–387.

97. Afraimovich E. L., Ding F., Kiryushkin V. V., Astafyeva E. I., Jin S., Sankov V. A. TEC Response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 31, N 13. – P. 3601–3613.

98. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Muneane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake // *Earth Planets Space*. – 2011. – Vol. 63, N 7. – P. 853–857.

99. Liu J. Y., Chen C. H., Sun Y. Y., Chen C. H., Tsai H. F., Yen H. Y., Chum J., Laštovička J., Yang Q. S., Chen W. S., Wen S. The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan / J. Y. Liu, C. H. Chen, Y. Y. Sun [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – Vol. 43, N 4. – P. 1759–1765.

100. Heki K. Ionospheric disturbances related to Earthquakes. In *Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges*. Wiley/AGU Book Space Physics and Aeronomy, Volume 3, edited by C. Huang and G. Lu, P. 320, ISBN:978-1-119-50755-0, 2020.

101. Bauer S. J. A possible troposphere-ionosphere relationship // *J. Geophys. Res.* – 1957. – Vol. 62, N 3. – P. 425–430.

102. Bauer S. J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes // *J. Geophys. Res.* – 1958. – Vol. 63, N 2. – P. 265–269.

103. Baker D. M., Davies K. F2-region acoustic waves from severe weather // *J. Atmos. Terrest. Phys.* – 1969. – Vol. 31, N 11. – P. 1345–1352.

104. Prasad S. S., Schneck L. J., Davies K. Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – Vol. 37, N 10. – P. 1357–1363.

105. Hung R. J., Kuo J. P. Ionospheric observation of gravity-waves associated with Hurricane Eloise // *J. Geophys.* – 1978. – Vol. 45, N 1. – P. 67–80.

106. Huang Y. N., Cheng K., Chen S. W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system // *Radio Sci.* – 1985. – Vol. 20, N 4. – P. 897–906.

107. Okuzawa T., Shibata T., Ichinose T., Takagi K., Nagasawa C., Nagano I., Mambo M., Tsutsui M., Ogawa T. Short-period disturbances in the ionosphere observed

at the time of typhoons in September 1982 by a network of HF Doppler receivers // J. Geomag. Geoelectr. – 1986. – Vol. 38, 4. – P. 239–266.

108. Boška J., Šauli P. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere // Phys. Chem. Earth. P. C.: Solar, Terr. Planet. Sci. – 2001. – Vol. 26, N 6. – P. 425–428.

109. Vanina-Dart L. B., Pokrovskaya I. V., Sharkov E. A. Studying the interaction between the lower equatorial ionosphere and tropical cyclones according to data of remote and rocket sounding // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2007. – N 2. – P. 19–27.

110. Xiao Z., Xiao S. G., Hao Y. Q., Zhang D. H. Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112, N A4. – P. A04304.

111. Afraimovich E. L., Voeikov S. V., Ishin A. B., Perevalova N. P., Ruzhin Yu. Ya. Total electron content variations during the powerful typhoon of August 5–11, 2006, near the southeastern coast of China // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – Vol. 48, N 5. – P. 674–679.

112. Bondur V. G. Ionospheric Effect of Large-Scale Atmospheric Vortex by the Example of Hurricane Katrina / V. G. Bondur, S. A. Pulinets, D. Uzunov // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2008. – N 6. – P. 3–11 (In Russian).

Bondur V. G., Pulinets S. A., Uzunov D. Ionospheric Effect of Large-Scale Atmospheric Vortex by the Example of Hurricane Katrina // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2008. – N 6. – P. 3–11.

113. Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC / T. Mao, J. Wang, G. Yang [et al.] // Chin. Sci. Bull. – 2010. – Vol. 55, N 8. – P. 712–717.

114. Typhoon-induced concentric airglow structures in the mesopause region / S. Suzuki, S. L. Vadas, K. Shiokawa [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2013. – Vol. 40. – P. 5983–5987.

115. Polyakova A. S., Perevalova N. P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean // Adv. Space Res. – 2013. – Vol. 52. – P. 1416–1426.

116. Yue J., Miller S. D., Hoffmann L., Straka W. C. Stratospheric and mesospheric concentric gravity waves over Tropical Cyclone Mahasen: Joint AIRS and VIIRS satellite observations // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2014. – Vol. 119. – P. 83–90.

117. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Ratovsky K. G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2015. – Vol. 136. – P. 235–243.

118. Chou M.-Y., Lin C. C. H., Yue J., Chang L. C., Tsai H.-F., Chen C.-H. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – Vol. 44. – P. 7569–7577.

119. Li W., Yue J., Yang Y. [et al.] Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2017. – Vol. 161. – P. 43–54.

120. Li W., Yue J., Wu S. [et al.] Ionospheric responses to typhoons in Australia during 2005–2014 using GNSS and FORMOSAT-3/COSMIC measurements // *GPS Solutions.* – 2018. – Vol. 22, N 3. – P. 1–22.

121. Fišer J., Chum J., Liu J.-Y. Medium-scale traveling ionospheric disturbances over Taiwan observed with HF Doppler sounding // *Earth, Planets and Space.* – 2017. – Vol. 69. – P. 131.

122. Chum J., Liu J.-Y., Podolská K., Šindelářová T. Infrasound in the ionosphere from earthquakes and typhoons // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2018. – Vol. 171. – P. 72–82.

123. Zakharov V. I., Pilipenko V. A., Grushin V. A., Khamidullin A. F. Impact of typhoon Vongfong 2014 on the Ionosphere and Geomagnetic Field According to Swarm Satellite Data: 1. Wave Disturbances of Ionospheric Plasma // *Solar-Terr. Physics.* – 2019. – Vol. 5, N 2. – P. 101–108.

124. Isaev N. V., Sorokin V. M., Chmyrev V. M., Serebryakova O. N. Ionospheric electric fields related to sea storms and typhoons // *Geomag. Aeron.* – 2002. – Vol. 42, N 5. – P. 638–643.

125. Isaev N. V., Kostin V. M., Belyaev G. G. [et al.] Disturbances of the topside ionosphere caused by typhoons // *Geomag. Aeron.* – 2010. – Vol. 50, N 2. – P. 243–255.
126. Sorokin V. M., Isaev N. V., Yaschenko A. K. [et al.] Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* – 2005. – Vol. 67. – P. 1269–1279.
127. Kuester M. A., Alexander M. J., Ray E. A. A model study of gravity waves over Hurricane Humberto (2001) // *J. Atmos. Sci.* – 2008. – Vol. 65, N 10. – P. 3231–3246.
128. Zakharov V. I., Kunitsyn V. E. Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to groundbased GPS network data // *Geomagn. Aeron.* – 2012. – Vol. 52, N 4. – P. 533–545.
129. Yiğit E., Knížová P. K., Georgieva K., Ward W. A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2016. – Vol. 141. – P. 1–12.
130. Gossard E. E., Hooke W. H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation* // Elsevier Scientific Publ. Co., 1975. – 456 p.
131. Pokhotelov O. A., Parrot M., Fedorov E. N., Pilipenko V. A., Surkov V. V., Gladyshev V. A. Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources // *Ann. Geophys.* – 1995. – Vol. 13, N 11. – P. 1197–1210.
132. Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 1. – Москва: Мир, 1974. – 384 с.
133. Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. – Москва: Мир, 1975. – 512 с.
134. Чижевский А. Л. *Земное эхо солнечных бурь.* – Москва: Мысль, 1976. – 367 с.
135. Солнечно-земная физика / пер. с англ. под ред. И. А Жулина, Г. А. Скуридина. – Москва: Мир, 1968. – 428 с.



136. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. – Москва: Наука, 1981. – 144 с.
137. Витинский Ю. И. Солнечная активность. – Москва: Наука, 1983. – 193 с.
138. Kivelson M. G., Russell C. T. Introduction to Space Physics. – Cambridge: Cambridge Atmospheric & Space Science Series, 1995. – 568 p.
139. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. – Москва : МНЭПУ, 2000. – 374 с.
140. Benestad R. E. Solar Activity and Earth's Climate. 2<sup>nd</sup> ed. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – XXVI, 316 p.
141. Kallenrode May-Britt. Space Physics: An introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres. – New York: Springer, 2004. – XIV, 482 p.
142. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А., Мартынюк В. С. Космическая погода и наша жизнь. – Фрязино: Век 2, 2004. – 224 с.
143. Robinson R. M. Book Review: Space Weather, Environment and Societies. – Space Weather, Vol. 4, S05004, 2006. – 242 p.
144. Кременецький І. О., Черемних О. К. Космічна погода: механізми і прояви. – Київ: Наукова думка, 2009. – 144 с.
145. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей. – Москва : Университетская книга, 2011. – 174 с.
146. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments // Annales Geophysicae. – 2002. – Vol. 20, N 7. – P. 1081–1104.
147. Мирошниченко Л. И. Проблема «Солнце–Земля»: современные концепции и физические механизмы // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 17–22.
148. Buonsanto M. J., Codrescu M., Emery B. A. [et al.] Recent Results of the CEDAR Storm Study // Adv. Space Res. – 1997. – Vol. 20, N 9. – P. 1655–1664.

149. MIT Haystack Observatory: <http://www.haystack.mit.edu/css/> [Дата доступа: 20.02.2021].
150. Fox N. J., Peredo M., Thompson B. J. Cradle to Grave Tracking of the January 6–11, 1997 Sun-Earth Connection Event // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – Vol. 25, N 14. – P. 2461–2464.
151. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – Vol. 58, N 14. – P. 1527–1574.
152. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms // *J. Geophys. Res.* – 1959. – Vol. 64, N 3. – P. 305–321.
153. Obayashi T. Morphology of Storms in the Ionosphere // *Rev. Geophys.* – 1964. – Vol. 1. – P. 335–366.
154. Jones K. L., Rishbeth H. The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1971. – Vol. 33. – P. 391–401.
155. Matuura N. Theoretical models of ionospheric storms // *Space Sci. Rev.* – 1972. – Vol. 13. – P. 124–189.
156. Prölss G. W. Ionospheric F region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, edited by H. Volland / CRC Press, Boca Raton, Fla., 1995. – P. 195–248.
157. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* – 2006. – Vol. 44, N 4. – Paper No. 2005RG000193.
158. Balan N., Rao P. B. Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and the intensity of geomagnetic storms // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1990. – Vol. 52, N 4. – P. 269–275.
159. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically-equivalent sites – Part 1: Storm-time patterns for sub-auroral ionospheres // *Ann. Geophys.* – 2009. – Vol. 27, N 4. – P. 1679–1694.
160. Mendillo M., Narvaez C. Ionospheric storms at geophysically equivalent sites – Part 2: Local time patterns for sub-auroral ionospheres // *Ann. Geophys.* – 2010. – Vol. 28, N 7. – P. 1449–1462.

161. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 116. – P. A11328.

162. Essex E. A., Mendillo M., Schödel J. P. [et al.] A global response of the total electron content of the ionosphere to the magnetic storms of 17 December and 18 June 1972 // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1981. – Vol. 43. – P. 293–306.

163. Mannucci A. J., Tsurutani B. T., Iijima B. A., Komjathy A., Saito A., Gonzalez W. D., Guarnieri F. L., Kozyra J. U., Skoug R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween storms” // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – P. L12S02.

164. Richmond A. D., Matsushita S. Thermospheric response to a magnetic substorm // *J. Geophys. Res.* – 1975. – Vol. 80. – P. 2839–2850.

165. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* – 1994. – Vol. 99. – P. 3893–3914.

166. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., Carignan G. R., Roble R. G. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100. – P. 14673–14691.

167. Lin C. H., Richmond A. D., Heelis R. A. et al. Theoretical study of the low and mid latitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 storm: Relative importance of the neutral wind and the electric field // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110. – P. A12312.

168. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V. K., Alleyne H., Bailey G. J. Response of the ionosphere to super storms // *Adv. Space Res.* – 2007. – Vol. 41. – P. 548–555.

169. Lu G., Goncharenko L. P., Richmond A. D. [et al.] A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – P. A08304.

170. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993) // *Annales Geophysicae*. – 1997. – Vol. 15, N 6. – P. 719–728.

171. Jacovchouk O. S., Mursula K., Hollappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932 – 2009 // *J. Geophys. Res.* – 2012. – Vol. 117. – P. A03201.

172. Hazards due to comets and asteroids / T. Gehrels (Edit.) // Tucson; London: Univ. Arizona Press, 1994. – 1300 p.

173. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.

174. Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects / V. Adushkin, I. Nemchinov (Eds.) // Comprehensive overview of the threat posed by the impact of an asteroid or comet on Earth, 2008. – XI, 357 p.

175. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.

176. NASA Fireball and Bolide Reports NASA Near-Earth Object Program Office. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs>.

177. Yeomans D., Chodas P. Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [[http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball\\_130301.html](http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html)].

178. NASA – Asteroid 2012 DA14 – Earth Flyby Reality Check, 15 February 2013.

[Электронный ресурс]. Режим доступа: [<http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>].

179. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L. [et al.] A 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. – 2013. – Vol. 503. – P. 238–241.

180. Бронштэн В. А., Станюкович К. П. О движении больших тел в атмосферах планет // *Космические исследования*. – 1979. – Т. 17, № 6. – С. 858–865.

181. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. – Москва: Наука, 1981. – 416 с.
182. Бронштэн В. А. О физическом механизме квазинепрерывного дробления крупных метеорных тел // *Астрономический вестник*. – 1993. – Т. 27, № 3. – С. 65–74.
183. Бронштэн В. А. Применение теории Григоряна к расчету дробления гигантских метеороидов // *Астрономический вестник*. – 1994. – Т. 28, № 2. – С. 118–124.
184. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космические исследования*. – 1979. – Т. 17, № 6. – С. 875–893.
185. Hills J. G., Goda M. P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astron. J.* – 1993. – Vol. 105, N 3. – P. 1114–1144.
186. Стулов В. П., Мирский . Н. , Вислый А. И. Аэродинамика болидов. – Москва: Наука, 1995. – 240 с.
187. Кручиненко В. Г. Математико-фізичний аналіз метеорного явища. – Київ: Наукова думка, 2012. – 294 с.
188. Чурюмов К. И., Гулиев А. С, Кручиненко В. Г. [и др.] Кометно-астероидная опасность, истина и вымыслы. – Киев, Баку: Баку-Элм., 2012. – 178 с.
189. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D, Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G. Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. – 2013. – Vol. 342. – P. 1069–1073.

190. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G. Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization [Электронный ресурс].

Режим доступа: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1).

191. Fortov V. E., Sultanov V. G., Shutov A. V. Chelyabinsk Superbolide Explosion in the Earth's Atmosphere: A Common Phenomenon or Unique Coincidence? // *Geochemistry International*. – 2013. – Vol. 51, N 7. – P. 549–567.

192. Кузьмичева М. Ю., Лосева Т. В. Глобальные ионосферные эффекты, вызванные Челябинским событием 15.02.2013 г. // *Динамические процессы в геосферах*. – 2013. – Вып. 4. – С. 32–40.

193. Ковалева И. Х., Ковалев А. Т., Попова О. П. [и др.] Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида // *Динамические процессы в геосферах*. – 2014. – Вып. 5. – С. 26–47.

194. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А. Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления // *Динамические процессы в геосферах*. – 2014. – Вып. 5. – С. 78–85.

195. Кузьмичева М. Ю., Лосева Т. В., Ляхов А. Н. Ионосферный эффект Челябинского события // *Динамические процессы в геосферах*. – 2014. – Вып. 5. – С. 86–95.

196. Givishvili G. V., Leshchenko L. N., Alpatov V. V. [et al.] Ionospheric Effects Induced by Chelyabinsk Meteor // *Solar System Research* – 2013. – Vol. 47, № 4. – P. 280–287.

197. Перевалова Н. П., Жупитяева А. С., Шестаков Н. В. [и др.] Поведение ионосферы во время взрыва Челябинского метеорита // Секция В. Физика околоземного космического пространства. БШФФ. – 2013. – С. 133–137.

198. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Смирнов В. М. Отклик ионосферы на вторжение и взрыв Южноуральского суперболида // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 646–657.

199. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // *Инженерная физика*. – 2013. – № 8. – С. 23–40.

200. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2013. – № 10. – С. 97–104.

201. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск» // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 231–243.

202. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // *Радиофизика и электроника*. – 2013. – Т. 4 (18), № 3. – С. 47–54.

203. Chernogor L. F. Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – Vol. 73. – P. 1105–1115.

204. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита // *Космічна наука і технологія*. – 2013. – Т. 19, № 6. – С. 38–46.

205. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2014. – Т. 30, № 3. – С. 27–42.

206. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 658–669.
207. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55, № 3. – С. 370–385.
208. Chernogor L. F. Physical effects associated with passage and burst of the Chelyabinsk meteoroid // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, № 15. – P. 1409–1416.
209. Chernogor L. F., Lazorenko O. V. System Spectral Analysis of the Ultra-Wideband Acoustic Signal Caused by the Chelyabinsk Meteoroid // 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. September, 5–11, 2016, Odessa, Ukraine. – P. 85–88.
210. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых эффектов, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2016. – Вип. 25. – С. 70–73.
211. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. // Кинематика и физика небесных тел. – 2017. – Т. 33, № 2. – С. 60–72.
212. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газо-пылевого следа Челябинского метеороида 2013 года // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 296–306.
213. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида // Радиофизика и радиоастрономия. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 53–66.
214. Черногор Л. Ф. Атмосферно-сейсмический эффект Челябинского метеороида // Радиофизика и радиоастрономия. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 123–137.
215. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела // Космические исследования. – 2017. – Т. 55, № 5. – С. 342–352.
216. Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Регуляризация алгоритма расчета высотно-временных характеристик, описывающих динамику падения



Челябинского метеороида // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2017. – Вип. 26. – С. 75–79.

217. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 427–436.

218. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика // Радиофизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 24–35.

219. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 267–280.

220. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динамика падения Челябинского метеороида: высотно-временные зависимости // Радиофизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 104–115.

221. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Multi-Fractal Analysis of the Acoustic Ultra-Wideband Signal Caused by the Chelyabinsk Meteoroid // Proceedings of the 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2018, Odessa, Ukraine. – P. 123–126.

222. Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Динамика падения Челябинского метеороида: материально-энергетический баланс // Радиофизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 176–188.

223. Челябинский суперболид. Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. – Челябинск: Изд-во Челябинского университета, 2016. – 223 с.

224. Гохберг М. Б., Олышанская Е. В., Стеблов Г. М. [и др.] Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452, № 2. – С. 208–212.

225. Гивишвили Г. В., Лещенко Л. Н., Алпатов В. В. [и др.] Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 304–311.

226. Данилкин Н. П., Журавлев С. В., Лапшин В. Б. К вопросу о состоянии ионосферы после пролета Челябинского метеороида // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 5. – С. 54–59.

227. Бернгардт О. И., Добрынина А. А., Жеребцов Г. А., Михалев А. В., Перевалова Н. П., Ратовский К. Г., Рахматулин Р. А., Саньков В. А., Сорокин А. Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452, № 2. – С. 205–207.

228. Ратовский К. Г., Белинская Ю. А., Кусонский О. А., Степанов А. Е. Ионосферный отклик на взрыв Челябинского метеороида по данным ионозондов азиатской части России. // Труды XXIV Всероссийской научной конференции. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24. Июнь, 29 – июль, 5, 2014, Иркутск. – С. 288 – 291.

229. Калихман А. Д., Тащилин А. В., Вугмейстер Б. О. Ионосферные возмущения, вызванные падением Челябинского метеорита // Труды XXIV Всероссийской научной конференции. Распространение радиоволн. Т. I. РРВ-24. Июнь, 29 – июль, 5, 2014, Иркутск. – С. 179–181.

230. Кутелев К. А., Бернгардт О. И. Среднемасштабные волновые возмущения в F-слое ионосферы в течении двух часов после падения метеорита Челябинск по наблюдениям радара ЕКВ // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Под ред. Н. А. Антипина. – Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. – С. 171 – 181.

231. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека // Фізіологічний журнал. – 2010. – Т. 56, № 3. – С. 25–40.

232. Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Физические процессы в нелинейной системе Космос – Земля: каналы воздействия на биосферу (человека) // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 6. – С. 347–360.

233. Черногор Л. Ф. Физика геокосмоса и космическая погода: системный подход, достижения, стратегия исследований // Перспективы космических исследований Украины. – Киев: Академперіодика, 2011. – С. 55–61.

234. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общей редакцией В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. – Москва: Анкил, 2000. – 640 с.

235. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова. – Москва: ГЕОС, 2016. – 795 с.

236. Нагорский П. М., Тарашук Ю. Е. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты // Изв. вузов. Физика. – 1993. – № 10. – С. 98–106.

237. Нагорский П. М. Модификация F-области ионосферы мощными импульсными источниками волн в нейтральном газе // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – 1998. – Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете. – 365 с.

238. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 2. – С. 143–162.

239. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождающих старты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 57–61.

240. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, № 1. – С. 5–28.

241. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 518–534.

242. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, сопутствовавших полетам космических аппаратов // *Космічна наука і технологія*. – 2004. – Т. 10, № 5/6. – С. 113–117.

243. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – № 3. – С. 4–35.

244. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // *Космічна наука і технологія*. – 2005. – Т. 11, № 1/2. – С. 37–57.

245. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет “Союз” и “Протон” // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2005. – Т. 10, № 3. – С. 254–272.

246. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 193–208.

247. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 209–218.

248. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в  $F$ -области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2006. – Т. 46, № 6. – С. 783–800.

249. Бурмака В. П., С. В. Панасенко, Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2007. – № 11. – С. 3–24.

250. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74–86.

251. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 26–44.

252. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Комплексная диагностика параметров ионосферной плазмы вдали от траектории стартующих ракет // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 5. – С. 667–682.

253. Черногор Л. Ф. Естествознание. Интегрирующий курс. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2007. – 536 с.

254. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие / Под общ. ред. Адушкина В. В., Козлова С. И., А. В. Петрова. – Москва: Анкил, 2000. – 640 с.

255. Booker H. G. A local reduction of F-region ionization due to missile transit // J. Geophys. Res. – 1961. – Vol. 66, N 4. – P. 1073–1079.

256. Jackson J. E., Whale H. A., Bauer S. J. Local ionospheric disturbance created by a burning rocket // J. Geophys. Res. – 1962. – Vol. 67, N 5. – P. 2059–2061.

257. Stone M. L., Bird L. E., Balser M. A Faraday rotation measurement on the ionospheric perturbation produced by a burning rocket // J. Geophys. Res. – 1964. – Vol. 69, Iss. 5. – P. 971–977.

258. Felker J. K., Roberts W. T. Ionospheric rarefaction following rocket transit // J. Geophys. Res. – 1966. – Vol. 71, Iss. 19. – P. 4692–4694.

259. Mendillo M., Hawkins G. S., Klobuchar J. A. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of “Skylab” // J. Geophys. Res. – 1975. – Vol. 80, N 6. – P. 2217–2228.

260. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космические исследования. – 1980. – Т. 18, № 2. – С. 266–277.

261. Zinn J., Sutherland C. D., Stone S. N., Duncan L. M., Behnke R. Ionospheric effects of rocket exhaust products—heao-c, skylab // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 1982. – Vol. 44, N 12. – P. 1143–1171.

262. Mendillo M. The effects of rocket launches of the ionosphere // *Adv. Space Res.* – 1981. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 275–290.

263. Forbes J. M. Upper atmosphere modifications due to chronic discharges of water vapour from space launch vehicle exhausts // *Advances in Space Research.* – 1982. – Vol. 2, N 3. – P. 85–90.

264. Rote D. M. Environmental Effects of Space Systems: A Review // in H. B. Garrett and C. P. Pike (eds.), *Space Systems and Their Interactions with Earth's Space Environment*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1980. – P. 3–53.

265. Bernhardt P. A., Kashiwa B. A., Tepley C. A., Noble S. T. «Spacelab-2» Upper Atmospheric Modification Experiment Over Arecibo. I – Neutral Gas Dynamics // *Astrophys. Lett. Comm.* – 1988. – Vol. 27. – P. 169–181.

266. Bernhardt P. A., Swartz W. E., Kelley M. C., Sulzer M. P., Noble S. T. “Spacelab 2 upper atmospheric modification experiment over Arecibo, 2, plasma dynamics // *Astrophys. Lett. Commun.* – 1988. – Vol. 27, N 3. – P. 183–198.

267. Mendillo M., Baumgardner J., Allen D. P., Foster J., Holt J., Ellis G. R., Klekociuk A., Reber G. Spacelab-2 Plasma Depletion Experiments for Ionospheric and Radio Astronomical Studies // *Science.* – 1987. – Vol. 238, Iss. 4831. – P. 1260–1264.

268. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах // *Космический проект «Ионосат-Микро».* – Киев: Академперіодика, 2013. – С. 160–182.

269. Domnin I. F., Chepurnyu Ya. M., Emelyanov L. Ya. [et al.] Kharkiv Incoherent Scatter Facility // *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ».* *Радіофізика та іоносфера.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 47 (1089). – С. 28–42.

270. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q. [и др.] Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере // *Вісник Харківського національного*

університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2018. – Вип. 28. – С. 88–93.

271. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – Москва: Мир, 1990. – 584 с.

272. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – Vol. 13, N 2. – P. 120–137.

273. Залюбовский И. И., Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Система Земля – атмосфера – геокосмос: основные свойства, процессы и явления // Космічні дослідження в Україні. 2006–2008. Звіт, підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. – Київ, 2008. – С. 19–29.

274. Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Физические эффекты в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях // Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010. Звіт, підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. – Київ. – 2011. – С. 16–23.

275. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. Radio probing of the perturbations originating in the near-Earth plasma from natural and anthropogenic energy sources // Матеріали міжнародної конференції “Астрономія в Україні–2000 и перспектива. Кинематика и физика небесных тел”. 2000, Киев, Украина. – № 3 – С. 497–500.

276. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near Earth plasma // Матеріали міжнародної конференції “Астрономія в Україні–2000 и перспектива. Кинематика и физика небесных тел. 2000, Киев, Украина. – № 3. – С. 514–516.

277. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. HF Doppler probing the disturbances originating in the ionosphere from natural and anthropogenic sources // Proc. VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. September 12–15, 2000, Kharkov, Ukraine. – Vol. 2. P. 652–654.

278. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Vol. 3, N 2. – P. 191–197.

279. Rozumenko V. T., Kostrov L. S., Martynenko S. I. [et al.] Studies of Global and Large-Scale Ionospheric Phenomena due to Sources of Energy of Different nature // Turkish Journal of Physics. – 1994. – Vol. 18, N 11. – P. 1193–1198.

280. Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, № 5/6. – С. 76–80.

281. Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений // Успехи современной радиоэлектроники – 2005. – № 3. – С. 36–54.

282. Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в среднеширотной мезосфере // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 2/3. – С. 37–44.

283. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // Problems of Atomic Science and Technology. – 2013. – Vol. 86, N 4. – P. 136–139.

284. Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях // Космічні дослідження в Україні 2012 – 2014. Звіт, підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. – Київ, 2014. – С. 13–20.

285. Черногор Л. Ф., Розуменко В. Т. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях // Національна академія наук України. Державне космічне агенство України. – Київ: Академперіодика, 2016. – С. 25–33.

286. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Розуменко В. Т. Взаимодействие сверхмощных радиоимпульсов наносекундной длительности с атмосферой и



плазмой нижней ионосферы // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2017. – Вип. 27. – С. 53–56.

287. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Rozumenko V. T., Shevelev M. B. The Parameters of the Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk meteoroid: System Statistic Analysis Results // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2–6, 2019. – P. 938–941.

288. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2020. – Vol. 207. – P. 105336.

289. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – Москва: Наука, 1973. – 272 с.

290. Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. – New York, Heidelberg, Berlin: Springer. – Verlag, 1978. – 465 p.

291. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: монографія. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразіна, 2014. – 544 с.

292. Yampolski Y., Milikh G., Zalizovski A., Koloskov A., Reznichenko A., Nossa E., Bernhardt P. A., Briczinski S., Grach S. M., Shindin A., Sergeev E. Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. – 2019. – Vol. 6. – Article No. 12.

293. <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>

294. <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>

295. [http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk\\_130301.html](http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk_130301.html)

296. <http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors>

297. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 1. – С. 119–132.

298. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 6. – С. 854–856.

299. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 132–143.

300. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lral#summary>

301. [http://pts.mi-perm.ru/region/korkino\\_meteor.htm](http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm)

302. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. – 2002. – Vol. 420. – P. 294–296.

303. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2019. – Vol. 186. – P. 88–103.

304. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018 // Radio Science. – 2020. – Vol. 55, Issue 2. – e2019RS006866.

305. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2–6, 2019. – 2019. – P. 88–93.

306. Yang Y.-M., Komjathy A., Langley R. B. [et al.] The 2013 Chelyabinsk meteor ionospheric impact studied using GPS measurements // Radio Sci. – 2014. – Vol. 49. – P. 341–350.

307. Perevalova N. P., Shestakov N. V., Voeykov S. V. [et al.] Ionospheric disturbances in the vicinity of the Chelyabinsk meteoroid explosive disruption as inferred from dense GPS observations // Geophys. Res. Lett. – 2015. – Vol. 42, N 16. – P. 6535–6543.

308. Gokhberg M. B., Ol'shanskaya E. V., Steblov G. M., Shalimov S. L. The Chelyabinsk meteorite: Ionospheric response based on GPS measurements // Doklady Earth Sciences. – 2013. – Vol. 452, N 1. – P. 948–952.

309. Chernogor L. F. Disturbance in the Lower Ionosphere That Accompanied the Reentry of the Chelyabinsk Cosmic Body // *Cosmic Research*. – 2017. – Vol. 55, N 5. – P. 323–332.

310. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере // Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 268 с.

311. Казимировский Э. С., Вергасова Г. В. Отклик ветров в нижней термосфере на геомагнитную бурю в марте 1989 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1991. – Т. 31, № 5. – С. 917–922.

312. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. – Новосибирск: Наука, 1979. – 343 с.

313. Мерзляков Е. Г., Портнягин Ю. И. Многолетние изменения параметров ветрового режима нижней термосферы умеренных широт (90 – 100 км) // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 1999. – Т. 35, № 4. – С. 531–542.

314. Портнягин Ю. И., Шпренгер К., Лысенко И. А. [и др.]. Измерение ветра на высотах 90–100 км наземными методами – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 344 с.

315. Harris M. J., Arnold N. F., Aylward A. D. A study into the effect of the diurnal tide on the structure of the background mesosphere and thermosphere using the new coupled middle atmosphere and thermosphere (CMAT) general circulation model // *Ann. Geophysicae*. – 2002. – Vol. 20, N 2. – P. 225–235.

316. Hocking W. K., Rottger J. The structure of turbulence in the middle and lower atmosphere seen by and deduced from MF, HF and VHF radar, with special emphasis on small-scale features and anisotropy // *Ann. Geophysicae*. – 2001. – Vol. 19, N 8. – P. 933–944.

317. Holdsworth D. A., Vincent R. A., Reid I. M. Mesospheric turbulent velocity estimation using the Buckland Park MF radar // *Annales Geophysicae*. – 2001. – Vol. 19, N 8. – P. 1007–1017.

318. Jacoby C., Portnyagin Yu. I., Solovjova T. V. [et al.] Climatology of the semidiurnal tide at 52 – 56°N from ground-based radar wind measurements 1985 – 1995 // *J. Atm. Sol.–Terr. Phys.* – 1999. – Vol. 61, N 13. – P. 975–991.

319. Kashcheev B. I., Oleynikov A. N. Dynamic regime of the mesopause – lower thermosphere at mid-latitudes of the northern hemisphere by radio meteor observations // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1994. – Vol. 56, N 9. – P. 1197–1207.

320. Manson A., Meek C., Hagan M. [et al.] Seasonal variations of the semi-diurnal and diurnal tides in the MLT: multi-year MF radar observations from 2 to 70°N, and the GSWM tidal model // *J. Atm. Sol.–Terr. Phys.* – 1999. – Vol. 61, N 12. – P. 809–828.

321. Manson A. H., Meek C. E., Hall G., McMurray R. Winds and waves from the Canadian prairies (CNSR) triple-MF radar system // *Geophys. Res. Lett.* – 1993. – Vol. 20, N 13. – P. 1375–1378.

322. Shepherd M. G., Meek C. E., Hocking W. K., Hall C. M., Partamies N., Sigernes F., Manson A. H., Ward W. E. Multi-instrument study of the mesosphere-lower thermosphere dynamics at 80°N during the major SSW in January 2019 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2020. – Vol. 210. – Article No. 105427.

323. Middleton H. R., Mitchell N. J., Muller H. G. Mean winds of the mesosphere and lower thermosphere at 52° N in the period 1988–2000 // *Ann. Geophysicae*. – 2002. – Vol. 20, N 1. – P. 81–91.

324. Namboothiri S. P., Manson A. H., Meek C. E. Variations of mean winds and tides in the upper middle atmosphere over a solar cycle, Saskatoon, Canada, 52°N, 107°W // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1993. – Vol. 55, N 10. – P. 1325–1334.

325. Namboothiri S. P., Meek C. E., Manson A. H. Variations of mean winds and solar tides in the mesosphere and lower thermosphere over time scales ranging from 6 months to 11 yr: Saskatoon, 52°N, 107°W / S. P. Namboothiri, C. E. Meek, A. H. Manson // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1994. – Vol. 56, N 10. – P. 1313–1325.

326. Portnyagin Y. I., Solovjova T. V. Global empirical wind model for the upper mesosphere/lower thermosphere. I. Prevailing wind // *Ann. Geophysicae*. – 2000. – Vol. 18, N 3. – P. 300–315.

327. Roble R. G., Readly E. C. A thermosphere / ionosphere / mesosphere electrodynamics general circulation model (TIME-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30–500 km) // *Geophys. Res. Lett.* – 1994. – Vol. 21, N 6. – P. 417–420.

328. Singer W., Bremer J., Hoffman P. [et al.] Geomagnetic influences upon tides – winds from MLT radars // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1994. – Vol. 56, N 10. – P. 1301–1311.

329. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. [и др.] Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* – 1999. – № 7. – С. 3 – 15.

330. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. [и др.] Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // *Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника.* – 1988. – № 318. – С. 21–24.

331. Панасенко С. В. Параметры динамических процессов в области мезопаузы по данным харьковского радара частичных отражений // *Взаимодействие полей и излучения с веществом: Труды VII Конференции молодых ученых. Иркутск, 13 – 18 сентября 2004 г. БШФФ.* – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004. – С. 148–151.

332. Meek C. E. An efficient method for analyzing ionospheric drifts data // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1980. – Vol. 42, N 9–10. – P. 835–839.

333. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – Москва: Мир, 1976. – 755 с.

334. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в мезосфере // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10, № 5/6. – С. 122–127.

335. Vandeppeer B. G. V., Hocking W. K. A comparison of Doppler and Spaced Antenna Techniques for the measurement of turbulent energy dissipation rates // *Geophys. Res. Lett.* – 1993. – Vol. 20, N 1. – P. 17–20.

336. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики радиосигналов, принимаемых радаром частичных отражений // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2004. – Т. 9, № 1. – С. 234–247.

337. Manson A. H., Meek C. E., Koshyk J. [et al.] Gravity wave activity and dynamical effects in the middle atmosphere (60 – 90 km): observations from an MF/MLT radar network, and results from the Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM) // J. Atm. Sol.–Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64, N 1. – P. 65–90.

338. Борисов Н. Б., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. – М.: ИЗМИРАН, 1985. – 184 с.

339. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. – 1998. – № 405. – С. 157–177.

340. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. – 1999. – № 427, вип. 1. – С. 3–22.

341. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 8. – С. 3–19.

342. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1.

Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, N 4–5. – P. 6–20.

343. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, N 6. – P. 1–22.

344. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Physical effects in the atmosphere and geospace environment under quiet and disturbed conditions // Space Research in Ukraine 2018 – 2020. Report to COSPAR. – P. 61–70.

345. Gokov A. M., Martynenko S. I., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F. Remote earthquake-induced large-scale ionospheric disturbances and strong mesospheric electric fields // Telecommunications and Radio Engineering. – 2002. – Vol. 57, Is. 10–11. – P. 136–140.

346. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 // Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May, 28–31, 2018, Kyiv, Ukraine – P. 87–88.

347. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., Zheng Y. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Proceedings. – 2020. – P. 354–359.

348. Surkov V., Hayakawa M. *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*. Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2014. 486 p.

349. Laštovička, J., Hruška, F., Burešová, D., & Baše, J. (2010b). Horizontal velocities and propagation directions of gravity waves in the ionosphere over the Czech Republic. J. Geophys. Res.: Space Physics., 115 (A11).

350. Chum, J., Athieno, R., Baše, J., Burešová, D., Hruška, F., Laštovička, J., & Šindelářová, T. (2012). Statistical investigation of horizontal propagation of gravity waves in the ionosphere over Europe and South Africa. *J. Geophys. Res.: Space Physics.*, 117 (A3).

351. Chum, J., Bonomi, F. A. M., Fišer, J., Cabrera, M. A., Ezquer, R. G., Burešová, D., & Ise, J. E. (2014). Propagation of gravity waves and spread F in the low-latitude ionosphere over Tucumán, Argentina, by continuous Doppler sounding: First results. *J. Geophys. Res.: Space Physics.*, 119(8), 6954–6965.

352. Digital Typhoon: Typhoon 201919 (Hagibis) [Reiwa First Year East Japan Typhoon] <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/1/201919.html.en>, (Останній доступ: 7 серпня 2020 р.).

353. National Centers for Environmental Prediction. Environmental Modeling Center (EMC). <http://ftp.emc.ncep.noaa.gov/wd20vxt/hwrf-init/decks/bwp202019.dat>

354. Digital Typhoon: The Intensity and Size of Typhoons – Units of Pressure and Wind: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/help/unit.html.en#TD>  
(останній доступ: 7 лютого 2021 р.)

355. Цифровий тайфун: Графіки відстеження тайфунів – Графіки відстеження тайфунів <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/help/track.html.en#sign>,  
(останній доступ: 7 серпня 2020 р.)

356. Ionosonde Stations in Japan:

URL: <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>

(last access: 15 August 2020).

357. OMNIWeb. NASA/Goddard Space Flight Center.

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

(Last access: Feb 20, 2021)

358. Chernogor L. F. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1998. – Vol. 3, N 2. – P. 191–197.

359. Ionospheric storms associated with geospace storms as observed with the Kharkiv incoherent scatter radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko,



**V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Sun and Geosphere. – 2008. – Vol. 3, N 2. – P. 81 – 86.

360. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 66, Is. 2. – P. 226–242.

361. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Proceedings. – P. 253–258.

362. Zheng Y., Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Magnetic and ionospheric effects of the 5 – 6 August 2019 geospace storm // Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. May 27 – 29, 2020. Kyiv, Ukraine. – P. 79–80.

363. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 // Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 – May 31, 2019. – P. 88–90.

364. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Sun and Geosphere. – 2012. – Vol. 7, N 2. – P. 133–139.

365. Chernogor L. F. The observational features of the November 7 – 10, 2004 geospace superstorm in the lower ionosphere / L. F. Chernogor, S. V. Panasenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar–Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences. – 02 – 06 June 2008. – Sozopol, Bulgaria. – Book of Abstracts. – P. 50–51.

366. Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radars / C. E. Meek, A. H. Manson, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Journal of

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2004. – Vol. 66, N 10. – P. 881–890.

367. Chernogor L. MF radar studies of wave disturbances in the mesosphere / L. Chernogor, S. Clifford, S. Panasenko, **V. Rozumenko** // 36th COSPAR Scientific Assembly. – 2006. – C2.2-0083-06.

368. Dorohov V. L. Upgrades to the Kharkiv V. N. Karazin National University MF radar antenna / V. L. Dorohov, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov // Proceedings of the 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – P. 370–372.

369. <http://www.noaa.gov/>

370. Остапенко А. А., Мальцев Ю. П. Связь потока электромагнитной энергии в высокоширотную ионосферу с параметрами солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2005. – 45, № 2. – С. 176–181.

371. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7 – 10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – Vol. 47, N 5. – P. 608–620.

372. Клейменова Н. Г. Вариации параметров СДВ-сигналов на радиотрассе Австралия – Камчатка во время магнитных бурь / Н. Г. Клейменова, О. В. Козырева, А. А. Рожной, М. С. Соловьева // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2004. – Т. 44, № 3. – С. 385–393.

373. Рожной А. А. Влияние неоднородностей солнечного ветра и ММП на параметры ДВ (40 кГц) сигналов на среднеширотной трассе / А. А. Рожной, Н. Г. Клейменова, О. В. Козырева, М. С. Соловьева // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 459–466.

374. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 5/6. – С. 12–21.

375. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гришкевич Л. В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1980. – Т. 20, № 3. – С. 547–548.

376. Клицук В. П., Марченко С. Г., Соколов С. Н. Эффекты крупномасштабного высыпания релятивистских магнитосферных электронов во время и после геомагнитной бури 27–28 ноября 1990 г. по данным распространения СДВ // Геомагнетизм и аэрономия. – 1993. – Т. 33, № 4. – С. 93–100.

377. Козырева О. В., Клейменова Н. Г., Шотт Ж. Ж. Геомагнитные пульсации начальной фазы магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 1. – С. 37–46.

378. Отдел радиофизики геокосмоса:

[[http://geospace.com.ua/data/metmag\\_mf.php](http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php)] (Дата: 24 лютого 2021 р.)

379. Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kapanin I. I., Karpachev A. I., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Mashtaler N. N., Milovanov Yu. B., Misyura V. A., Pakhomova O. V., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Protopop E. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Fedorenko Yu. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F., Chulakov S. G., Shemet O. S. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft // Физика космической плазмы. Сборник трудов Международного семинара. – 6 – 10 июня 1993 года. – Киев, Украина. – Киев: Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка. – Киев: НКАУ, 1995. – С. 161–170.

380. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Vol. 3, N 2. – P. 181–190.

381. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 209 – 226.

382. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 227–246.

383. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, № 2. – С. 75 – 81.

384. Горелый К. И., Лампей В. К., Никольский А. В. Ионосферные эффекты стартов космических аппаратов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 4, № 3. – С. 158 – 161.

385. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Smirnova K. O. Detection of Effects from Rocket Launches Employing the System Spectral Analysis // Proceedings of the XVII International Young Scientists' Conference on Applied Physics. May, 23–27, 2017, Kyiv, Ukraine – P. 180–181.

386. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Smirnova K. O. Geomagnetic variations caused by rocket launches from the Plesetsk and the Baikonur cosmodromes // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2017. – Вип. 26. – С. 84–87.

387. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Smirnova K. O. Using the System Spectral Analysis for Detecting Effects from Rocket Launches from Remote Cosmodromes // XIII International Conference «Electronics and Applied Physics». October 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine. – P. 217–218.

388. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 7. – С. 38 – 56.

389. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 31–43.

390. Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты активных экспериментов, проведенных 18 февраля 2004 г. // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 4. – С. 302–317.

391. Черногор Л. Ф. Геомагнитный эффект стартов и полетов крупных космических аппаратов // Космические исследования. – 2013. – Т. 51, № 6. – С. 455–469.

## ДОДАТОК А

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

## Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, № 2. — С. 181–190. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
2. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 209–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
3. Динамические процессы в среднеширотной мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. — 2006. — Т. 12, № 2/3. — С. 37–44. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
4. Chernogor L. F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Radio Physics and Radio Astronomy. — 2008. — Vol. 13, N 2. — P. 120–137. *(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*
5. Chernogor L. F. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Problems of Atomic Science and Technology. — 2013. — Vol. 86, N 4. — P. 136–139. *(Особистий внесок здобувача:*

*Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

6. Geomagnetic variations caused by rocket launches from the Plesetsk and the Baikonur cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 26. — С. 84–87. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

7. Черногор Л. Ф. Взаимодействие сверхмощных радиоимпульсов наносекундной длительности с атмосферой и плазмой нижней ионосферы / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов, **В. Т. Розуменко** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 27. — С. 53–56. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

8. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar / Qiang Guo, Yu Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2019. — Вип. 30. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

9. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере / Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Q. Guo, Yu Zheng, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цимбал // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2018. — Вип. 28. — С. 88–93. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

***Наукові праці в зарубіжних наукових виданнях:***

10. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 4–5. — P. 6–20.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

11. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 6. — P. 1–22.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

12. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури / К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко** О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. — 1999. — Т. 39, № 1. — С. 72–78.

12 a. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm / K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. — 1999. — Vol. 39, N 1. — P. 69–75. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

13. Martynenko S. I. New possibilities for mesospheric electricity diagnostics / S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Advances in Space Research. — 2001. — Vol. 27, Iss. 6–7. — P. 1127–1132. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

14. Remote earthquake-induced large-scale ionospheric disturbances and strong mesospheric electric fields / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Telecommunications and Radio Engineering. — 2002. — Vol. 57, Is. 10–11. — P. 136–140. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

15. Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radars / C. E. Meek, A. H. Manson, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2004. — Vol. 66, N 10. — P. 881–890. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

16. Statistical parameters of nonisothermal lower ionospheric plasma in the electrically active mesosphere / S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. H. Manson, C. E. Meek // Advances in Space Research. — 2005. — Vol. 35, N 8. — P. 1467–1471. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз параметрів плазми в D області. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

17. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники — 2005. — № 3. — С. 36–54. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

18. Ionospheric storms associated with geospace storms as observed with the Kharkiv incoherent scatter radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Sun and Geosphere. — 2008. — Vol. 3, N 2. —



P. 81–86. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

19. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Sun and Geosphere. — 2012. — Vol. 7, N 2. — P. 133–139. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

20. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2019. — Vol. 186. — P. 88–103. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

21. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Radio Science. — 2020. — Vol. 55, Iss. 2. — e2019RS006866. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

22. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Advances in Space Research. — 2020. — Vol. 66, Iss. 2. — P. 226–242. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

23. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, S. N. Shulga, Y. Zheng // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2020. — Vol. 207. — Paper No. 105336. *(Особистий*

*внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

***Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

24. Studies of Global and Large-Scale Ionospheric Phenomena due to Sources of Energy of Different nature / **V. T. Rozumenko**, L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1193–1198. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

25. The Radiophysical Observatory for Remote Sounding of the Ionosphere / O. F. Tyrnov, K. P. Garmash, A. M. Gokov, A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, L. G. Kontzevaya, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, A. S. Shemet // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1260–1265. *(Особистий внесок здобувача: Написання розділу по методу часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

26. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вестник Харьковского университета. Серия «Радиофизика и электроника». — 1998. — № 405. — С. 157–177. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

27. Chernogor L. F. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** //

Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, N 2. — P. 191–197.  
*(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків частинок при стартах ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

28. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вісник Харківського університету. Серія «Радіофізика та електроніка». — 1999. — Вип. 1, № 427. — С. 3–22. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

29. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 7. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

30. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 8. — С. 3–19. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

31. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 227–246. *(Особистий внесок*

здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

32. Залюбовский И. И. Система Земля – атмосфера – геокосмос: основные свойства, процессы и явления / И. И. Залюбовский, Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні. 2006–2008. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАНУ-НКАУ. — Київ: Академперіодика, 2008. — С. 19–29.

32 a. Zalyubovsky I. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena / I. Zalyubovsky, L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. — Kyiv: Akadempriodyka, 2008. — P. 19–29.

(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

33. Черногор Л. Ф. Физические эффекты в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. — Київ: Академперіодика, 2011. — С. 16–23.

33 a. Chernogor L. Physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine. — Kyiv: Akadempriodyka, 2011. — P. 22–34.

(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

34. Черногор Л. Ф. Особенности физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2010–2012. Звіт підготовлений Інститутом

космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2012. — С. 31–48.

34 a. Chernogor L. Features of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2010–2012. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2012. — P. 29–46.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

35. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2012–2014. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2014. — С. 13–20.

35 a. Chernogor L. Study of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2012–2014. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2014. — P. 13–20.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

36. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. — Київ: Академперіодика, 2016. — С. 25–33.

36 a. Chernogor L. Results of the investigation of physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // National Academy of Science of Ukraine. State Space Agency of Ukraine. — Kyiv: Akademperiodyka, 2016. — P. 23–30.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

37. Chernogor L. Results of the Investigation of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2016–2018. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2018. — P. 41–51.

*(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

38. Chernogor L. Physical effects in the atmosphere and geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2018–2020. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2020. — P. 61–70. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збуреній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

**Список публікацій,  
які засвідчують апробацію матеріалів дисертації  
(Тези доповідей на наукових конференціях):**

39. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft / A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, I. I. Kapanin, A. I. Karpachev, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, N. N. Mashtaler, Yu. B. Milovanov, V. A. Misyura, O. V. Pakhomova, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, E. N. Protopop, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, S. G. Chulakov, O. S. Shemet // Физика космической плазмы : Международный семинар, Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет имени Тараса Шевченко, 6–10 июня 1993 г., Киев, 1995. — С. 161–170. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

40. Influence of global disturbances of the propagation of ionospheric MF and HF radio waves: Technique / L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, Yu. B. Milovanov,

**V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1996, 21–26 July 1996. – Baltimore, 1996. — Vol. 3. — P. 2236–2239. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

41. A method for derivation of electric fields in the lower ionosphere from measurements with a partial reflection facility / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine : MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 271–273. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

42. HF Doppler probing of ionospheric perturbations which accompanied the space shuttle Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

43. Chernogor L. F. Regularization algorithms for inverse problems in the radiowave probing of the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine : MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 154–156. *(Особистий внесок здобувача: постановка задачі, участь в обговоренні результатів.)*

44. Observations of ionospheric D region perturbations which accompanied the space shuttle orbiter Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background by partial reflection technique / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, A. I. Gritchin, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol. 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і*

*геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

45. Chernogor L.F. On the possibility of energetic particle precipitation from the magnetosphere into the middle latitude ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

46. Chernogor L. F. Investigations of energetic particle precipitations due to HF Radio heating and rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation : Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

47. Effects in the ionosphere during rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation : Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 84. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

48. Chernogor L. F. Numerical modeling of ionospheric effects of electron gyro-frequency radio emission turn-on / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1-491. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

49. Chernogor L. F. Numerical simulations of nonlinear interactions of non-stationary high-power electromagnetic waves with the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the



European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–492. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

50. Chernogor L. F. Geomagnetic micropulsations near Kharkiv stimulated by the "SURA" high-power HF facility / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands : Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–497. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

51. Chernogor L. F. Energetic particle fluxes in the midlatitude lower ionosphere from partial reflection radar measurements / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVIth General Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada : Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 437. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

52. Chernogor L. F. Variations of partially reflected radio signals after rocket launches / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // XXVIth General Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada : Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 467. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

53. Гармаш К. П. Исследование при помощи частично-отраженных радиосигналов параметров потоков энергичных частиц в среднеширотной нижней ионосфере / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция “Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 141–142. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

54. Гармаш К. П. Вариации статистических характеристик частично-отраженных радиосигналов после запусков мощных ракет / К. П. Гармаш,

**В. Т. Розуменко,** Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция “Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 357–358. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

55. Gokov A. M. Large-scale disturbances originating from remote earthquakes in the plasma at mesospheric heights / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine : Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 655–657. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

56. Chernogor L. F. Radio probing of the perturbations originating in the near-Earth plasma from natural and anthropogenic energy sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні - 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна : Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 497–500. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

57. Chernogor L. F. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near Earth plasma / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні – 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна : Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 514–516. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

58. Chernogor L. F. HF Doppler probing the disturbances originating in the ionosphere from natural and anthropogenic sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** // VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine : Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 652–654. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

59. Variations in HF Doppler radar spectra measured at vertical incidence / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands : Poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

60. Doppler radar measurements of bottomside ionosphere perturbations associated with space vehicle launch and maneuvering system burns / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands : Programme, poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0142. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

61. Доплеровское радиозондирование средней ионосферы в естественно-возмущенных условиях / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2 – 4 июля 2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация : Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 42–43. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

62. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е и F-областях ионосферы, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов /

Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2–4 июля 2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация : Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 44–45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

63. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 21 – 26 сентября 2002 р., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2002. — С. 45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

64. Доплеровское радиозондирование ионосферы как средство мониторинга состояния космической погоды / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 144–151. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

65. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 132–143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

66. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третя Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня

2003 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9, № 5/6. — С. 76–80. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

67. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопровождавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третья Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня 2003 р., Київ, Україна : Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9, № 2. — С. 76–81. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

68. Флуктуации геомагнитного поля, сопровождающие грозы / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Е. А. Пахомов, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г., Владимир, Российская Федерация : Сборник трудов конференции. — Владимир, 2003. — Т. 1. — С. 193–195. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітних ефектів грозових розрядів в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

69. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 91. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

70. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопровождавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 133. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

71. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в ионосфере, сопутствовавших стартам и полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Международная конференция «Современные проблемы физики и высокие технологии», посвященная 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ, 29 сентября–4 октября 2003 г., Томск, Российская Федерация : Материалы конференции. — Томск, 2003. — С. 464–467. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

72. Динамічні процеси на мезосферних висотах / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тирнов, Л. Ф. Черногор // Міжнародна наукова конференція «Каразінські природознавчі студії», 14–16 червня 2004 р., Харків, Україна : Матеріали конференції. — Харків, 2004. — С. 151–153. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

73. Параметры динамических процессов в мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Четвертая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 19–26 сентября 2004 г., Понизовка, Крым, Украина : Сборник тезисов. — Понизовка, 2004. — С. 57. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

74. Движения неоднородностей электронной концентрации в D-области ионосферы / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Международная конференция по физике солнечно-земных связей, 20–25 сентября 2004 г., Иркутск, Российская Федерация : Тезисы докладов. — Иркутск, 2004. — С. 60. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

75. Statistics on the parameters of nonisothermal ionospheric plasma in large mesospheric electric fields / S. Martynenko, **V. Rozumenko**, O. Tyrnov, A. Manson, C. Meek // 35th COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2004, Paris, France : 35th

COSPAR Scientific Assembly. — Vol. 35 — P. 533. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

76. VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60 – 70 km Altitude Range / A. H. Manson, C. E. Meek, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Meeting RTO-MP-IST-056 8 — 1 Characterising the Ionosphere, Neuilly-sur-Seine, France : Meeting Proceedings. — Neuilly-sur-Seine, 2006. — P. 8-1–8-24. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз впливу збурень на поширення радіохвиль. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

77. Комплекс для дистанционного зондирования околоземного космического пространства / О. Ф. Тырнов, К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, А. М. Цимбал // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006), 11–15 сентября 2006 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2006. — Т. 2. — С. 954–955. — ISBN 966-7968-90-1. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

78. MF radar studies of wave disturbances in the mesosphere / L. Chernogor, S. Clifford, S. Panasenko, **V. Rozumenko** // 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing, China : 36th COSPAR Scientific Assembly. — Beijing, 2006. — Vol. 36. — P. C2.2-0083-06. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

79. Ionospheric Storms Associated with Geospace Storms as Observed with the Kharkiv Incoherent Scatter Radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria : Book of

Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 52. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

80. Chernogor L. F. The observational features of the November 7 – 10, 2004 geospace superstorm in the lower ionosphere / L. F. Chernogor, S. V. Panasenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria : Book of Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 50–51. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

81. Статистические характеристики параметров ветра в мезосфере над Украиной / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // 8-я Украинская конференция по космическим исследованиям, 1–7 сентября 2008 г., Евпатория, Крым : Сборник тезисов. — Евпатория, 2008. — С. 41. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

82. Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory: Space Research / K. P. Garmash, A. I. Gritchin, S. I. Martynenko, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009), 14–18 сентября 2009 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2009 г. — Т. 2. — С. 943–944. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

83. Физические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. в Харькове / В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. —



Харьков, 2012. — С. 219–221. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

84. Processes in the bottomside ionosphere accompanied by the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8–12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets : Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 157 – 158. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

85. Geophysical and radio propagation effects of the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. A. Leus, **V. T. Rozumenko** // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8 – 12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets : Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 156–157. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

86. Розуменко В. Т. Магнито-ионосферные эффекты стартов и полетов космических аппаратов / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2012. — С. 224–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

87. Martynenko S. I. Temporal variations of electric fields density in the middle atmosphere / S. I. Martynenko, O. F. Tyrnov, **V. T. Rozumenko** // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013), 9–13 сентября 2013 г., Севастополь, Крым, Украина : Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2013. — Т. 2. — С. 1124–1125. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз електричних ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

88. Upgrades to the Kharkiv V. N. Karazin National University MF radar antenna / V. L. Dorohov, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine : Proceedings. — Odessa, 2013. — 2013 — P. 370–372. *(Особистий внесок здобувача: Опис антени радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

89. Розуменко В. Т. Физические процессы, сопровождающие старты и полёты мощных ракет / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор, В. П. Бурмака // I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24 – 25 октября 2013 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 32–35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

90. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических и наземных экспериментах и исследования распространения радиоволн различных диапазонов / К. П. Гармаш, В. А. Поднос, **V. T. Rozumenko**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24–25 октября 2013 г., Харьков : Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 89–110. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

91. Ionospheric, atmospheric, and geomagnetic effects of the March 20, 2015 solar eclipse over Kharkiv city / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» в рамках IX Всеукраїнського фестивалю науки присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всехсвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня

2015 р., Київ : Збірник тез доповідей. — Київ, 2015. — С. 107–108. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

92. Ионосферный, атмосферный и геомагнитный эффекты частичного солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // 15<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research, 24–28 August 2015, Odesa, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2015. — P. 145. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

93. Chernogor L. F. Effects of Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // International conference “Astronomy and Space Physics in Kyiv University”, May 24–27, 2016, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical observatory, Kyiv, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2016. — P. 95–96. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

94. Detection of Effects from Rocket Launches Employing the System Spectral Analysis / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XVII International Young Scientists' Conference on Applied Physics, May, 23–27, 2017, Kyiv, Ukraine : Proceedings. — Kyiv, 2017. — P. 180–181. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

95. Chernogor L. F. Magnetic and Ionospheric Effects of Power Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // 17<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research, August, 21–25, 2017, Odesa, Ukraine : Abstracts. — Odesa, 2017. — P. 152. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

96. Using the System Spectral Analysis for Detecting Effects from Rocket Launches from Remote Cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash,

**V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XIII International Conference “Electronics and Applied Physics”, October 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine : Abstracts. — Kyiv, 2017. — P. 217–218. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

97. Characterizing the infrasonic signal generated by the Chelyabinsk celestial body: Global statistics / L. F. Chernogor, Qiang Guo, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», 23–24 травня 2018 р., Умань, Україна : Програма і тези доповідей. — Умань, 2018. — С. 85–86. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

98. Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City / L. F. Chernogor, O. I. Liashchuk, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 87–88. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів хімічних вибухів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

99. The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid / L. F. Chernogor, G. Qiang, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 89–90. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

100. Chernogor L. F. The action of ultra-short super-powerful radio pulses on Earth's atmosphere and ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4–7, 2018, Odesa, Ukraine : Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 40. *(Особистий внесок*

здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

101. Chernogor L. F. The Action of Ultra-Short Super-Powerful Radio Pulses on Earth's Atmosphere and Ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4 – 7, 2018, Odesa, Ukraine : Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 322–325. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

102. Гармаш К. П. Геомагнитные эффекты, сопровождавшие старты ракет в 2017 — 2018 годах / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // 18 Українська конференція з космічних досліджень, 17 – 20 вересня 2018, Київ, Україна : Тези доповідей конференції. — Київ, 2018. — С. 25. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

103. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 87–88. *(Особистий внесок здобувача: Дослідження великомасштабних ефектів в іоносфері під дією окремих землетрусів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

104. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 88–90. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

105. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 2019 IEEE

2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine : Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 88–93. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

106. The Parameters of the Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk meteoroid: System Statistic Analysis Results / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine : Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 938–941. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

107. Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science, August 26–30, 2019, Kyiv, Ukraine : Programme, Abstracts, Information. — Kyiv, 2019. — P. 33. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

108. Solar flare of September 2017 magnetic effect / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, M. Yu. Holub, S. G. Leus, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 76–77. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

109. Magnetic and ionospheric effects of the 5 — 6 August 2019 geospace storm / Y. Zheng, Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine : Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 79–80. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

110. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week : 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine : Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 253–258. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

111. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week : 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine : Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 354–359. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*